ULUSLARARASI BESTSELLER

CHAD ORZEL

köpeğinize KUANTUM FİZİĞİNİ



nasıl öğretirsiniz?





aylak kitap

Köpeğinize Kuantum Fiziğini Nasıl Öğretirsiniz?



Chad Orzel

Çeviri

Ebru Kılıç



aylak kitap

İÇİNDEKİLER

GİRİŞ

Köpeğinize Neden Fizikten Bahsedeceksiniz? Kuantum Fiziğine Bir Giriş

Mohawk-Hudson Humane Society, Troy'un dışında bulunan tesislerinin hemen yakınındaki ormanın içine doğru küçük bir yol açmış, almayı düşündüğünüz köpekle birlikte burada yürüyüşe çıkabiliyorsunuz. Yolun kenarında, küçük bir açıklıkta bir bank var; banka oturup dışarı çıkardığım köpeğe bakıyorum.

Bankın yanına oturuyor, burnuyla elimi dürtüyor, ben de onun kulaklarının arkasını kaşıyorum. Karım ve ben birlikte birkaç köpeğe baktık; ama Kate'in işte olması gerektiğinden bir köpek seçmeye ben kendi başıma geldim. Bu köpek iyi bir tercih gibi görünüyor.

Bir yaşında bir melez; Alman çoban köpeğiyle başka bir cinsin kırması. Çoban köpeklerine özgü klasik siyah ve ten rengi tüyleri var, ama çoban köpeğinden daha küçük, kulakları da sarkık. Kulübesinin üstündeki levhada adının "Prenses" olduğu yazıyor yazmasına da bu ona pek uygun bir admış gibi durmuyor.

"Ne düşünüyorsun kızım?" diye soruyorum. "Seni nasıl çağırayım?"

"Bana Emmy de!" diyor.

"Neden o?"

"Çünkü adım bu, şapşal!"

Bir köpekten "şapşal" lafını işitmek biraz şaşırtıcı gelebilir, ama bir bildiği var herhalde. "Olur, bunu tartışamam. Peki, gelip bizimle yaşamak ister misin?"

"Eh, bakarız," diyor. "Yaratık durumu ne âlemde?"

"Efendim? Anlamadım…"

"Kovalamayı severim. Kovalayacağım yaratıklar olacak mı?"

"Ah tabii. Geniş denebilecek bir bahçemiz var, bir sürü de kuş ve sincap, ara sıra da tavşan."

"Ooo! Tavşanlara bayılırım!" Mutlu mutlu kuyruğunu sallıyor. "Peki ya yürüyüş meselesi? Yürüyüşe çıkacak mıyım?"

"Tabii."

"Peki ya ödül? Ödüllere bayılırım!"

"İyi bir köpek olursan ödül alırsın!"

Biraz içerlemiş görünüyor."Ben çok iyi bir köpeğim. Sen de bana ödül vereceksin. Hayatını nasıl kazanıyorsun?"

"Ne? Neler oluyor bakalım? Kim kimi değerlendiriyor?"

"Benim kadar iyi bir köpeğe layık mısın değil misin anlamam lazım." Şu "Prenses" adı ona sandığımdan daha uygun olabilir. "Ne iş yapıyorsun?"

"Karım Kate avukat, ben de Schenectady'de Union College'da fizik profesörüyüm. Atom fiziği ve kuantum optiği alanlarında ders verip araştırma yapıyorum."

"Kuantum nesi?"

"Kuantum optiği. Kabaca bir tanımla, ışığı ya da atomları ya da hem ışığı hem atomları kuantum fiziğini kullanarak tanımladığın durumlarda ışık ile atomlar arasındaki etkileşimin incelenmesi."

"Kulağa epey karışık geliyor."

"Öyle, ama büyüleyici mevzular. Kuantum fiziğinde her tür tuhaflık ve muhteşemlik var. Parçacıklar dalga gibi davranıyor, dalgalar parçacık gibi davranıyor. Parçacık özellikleri sen onları

ölçene kadar belirsiz. Boş uzay birden ortaya çıkıp kaybolan "sanal parçacıklarla" doluyor. Çok iyi."

"Hmm." Düşünceli görünüyor ve sonra şöyle diyor: "Son bir sınav."

"Nedir o?"

"Göbeğimi kaşı." Sırt üstü dönüveriyor, ben de uzanıp göbeğini kaşıyorum. Bir dakika sonra ayağa kalkıyor, silkeleniyor, "Tamamdır, gayet iyisin. Hadi eve gidelim," diyor.

Köpek edinmeyle ilgili belgeleri doldurmak için kulübenin yolunu tutuyoruz. Yürürken "Kuantum fiziği, ha? Sanırım bu konuda bir şeyler öğrenmem gerekecek," diyor.

"Bir ara açıklamaktan memnuniyet duyarım."

Çoğu köpek sahibi gibi ben de köpeğimle konuşarak çok vakit geçiriyorum. Sohbetlerimizin çoğu hayli sıradan: Onu yeme, mobilyalara tırmanma; hadi, yürüyüşe çıkalım. Ama bazı sohbetlerimiz kuantum fiziği hakkında.

Köpeğime neden kuantum fiziğinden bahsediyorum? Eh, hayatımı böyle kazanıyorum: Ben bir üniversitede fizik öğretiyorum. Sonuçta da kuantum fiziğini düşünmeye çok vakit harcıyorum.

Kuantum fiziği nedir? Kuantum fiziği, yaklaşık olarak 1900'den sonra keşfedilen kanunlara dayanan fizik anlamında "modern fiziğin" bir parçasıdır. Yaklaşık olarak 1900'den önce geliştirilmiş fizik kanunları ve ilkeleri "klasik fizik" olarak değerlendirilir.

Klasik fizik, gündelik nesnelerle ilgili fiziktir: tenis topları ve gıcırtılı oyuncaklarla, ocaklar ve buz küpleriyle, mıknatıslar ve elektrik telleriyle ilgili fizik. Çıplak gözle görülebilecek kadar büyük her şeye klasik hareket kanunları hükmeder. Klasik termodinamik ısınan ve soğuyan nesnelerin fiziğini, motorların ve buzdolaplarının işleyişini açıklar. Klasik elektromanyetizma ampul-

lerin, radyoların ve mıknatısların davranış biçimini açıklar.

Modern fizikse, gündelik olanın ötesine geçtiğimizde gördüğümüz tuhaf dünyayı betimler. Bu dünya ilk kez, 1800'lerin sonunda, 1900'lerin başında gerçekleştirilen; klasik fizik kanunlarıyla açıklanamayacak deneylerle gözler önüne serilmiştir.

Modern fizik, her biri klasik fizik kurallarından kökten bir ayrılık anlamına gelen iki kısma ayrılır. Bunlardan biri, görelilik, çok hızlı hareket eden ya da güçlü kütleçekim kuvvetlerinin yakınında bulunan nesnelerle ilgilenir. Albert Einstein göreliliği 1905'te ortaya koymuştur; görelilik başlı başına büyüleyici bir konudur, fakat bu kitabın kapsamı dışındadır.

Modern fiziğin ikinci kısmıysa köpeğime anlattığım konudur. Modern fiziğin ışık ve moleküller, tek tek atomlar, atomaltı parçacıklar gibi çok küçük şeylerle ilgilenen kısmına kuantum fiziği ya da kuantum mekaniği[1] adı verilmiştir. Max Planck "kuantum" terimini 1900'de geliştirmişti, Einstein da ışıkla ilgili ilk kuantum kuramını sunarak Nobel Ödülü kazanmıştı.[2] Kuantum mekaniği kuramı bunu izleyen otuz yıl içinde geliştirilmiştir.

Planck gibi ilk öncülerden, hidrojen atomunun ilk kuantum modelini çıkaran Niels Bohr'dan tutun bugün "kuantum elektrodinamiği" dediğimiz alanda bağımsız olarak çalışmalar yürüten Richard Feynman'a, Julian Schwinger'a varıncaya kadar kuantum kuramını oluşturan bilim insanları haklı olarak fiziğin devleri olarak görülür. Kuantum kuramının bazı unsurları fizik alanından dışarı çıkıp popüler imgelemin dikkatini çekmiştir: Werner Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, Erwin Schrödinger'in kedi paradoksu, Hugh Everett'in çoğul dünyalar yorumundaki paralel evrenler gibi.

1- "Kuantum fiziği", "kuantum kuramı", "kuantum mekaniği" terimleri az çok birbirinin yerine geçebilir.

2- Göreliliğin keşfine pek dokunmuyordu; ama Einstein'e Nobel verilmesinin resmi gerekçesi fotoelektrik etkiye ilişkin kuantum kuramıydı.

Kuantum mekaniği olmasaydı modern hayat imkânsız olurdu. Elektronun kuantum niteliği anlaşılmış olmasaydı bilgisayarlarımızı çalıştıran yarı iletken yongaların yapılması imkânsız olurdu. Işığın ve atomların kuantum niteliği anlaşılmamış olsaydı fiber optik iletişim hatlarından mesaj göndermek için kullandığımız lazerlerin yapılması imkânsız olurdu.

Kuantum kuramının bilim üzerindeki etkileri salt pratik olanın ötesine geçer, fizikçileri felsefi meselelerle boğuşmak zorunda bırakır. Kuantum fiziği evren hakkında bilebileceklerimize ve evrendeki nesnelerin özelliklerine sınırlamalar getirir. Hatta kuantum mekaniği, bir ölçüm yapmanın ne demek olduğuna dair anlayışımızı değiştirir. Gerçekliğin doğasının en temel düzeyde tam anlamıyla yeniden düşünülmesini gerektirir.

Kuantum mekaniği, hiçbir şeyin kesin olmadığı ve nesnelerin onları ölçünceye dek kesin özelliklere sahip olmadığı son derece tuhaf bir dünya betimler. Uzaktaki nesnelerin tuhaf biçimlerde birbirine bağlandığı, bizim evrenimizin yanı başında farklı tarihlere sahip koskoca evrenlerin var olduğu, "sanal parçacıkların" bomboş uzayda birden belirip kaybolduğu bir dünyadır bu.

Kuantum fiziği kulağa fantezi kurgu gibi gelebilir, ama bilimdir. Kuantum kuramında betimlenen dünya, mikroskobik ölçekte[3] bizim dünyamızdır. Kuantum fiziğinin öngördüğü tuhaf etkiler gerçektir, gerçek sonuçları ve uygulamaları vardır. Kuantum kuramı inanılmaz düzeyde bir kesinlikle sınanmıştır; bu da onu bilimsel kuramlar tarihinin en geçerli biçimde sınanmış kuramı haline getirmektedir. Kuantum kuramının en tuhaf tahminleri bile deneysel olarak doğrulanmıştır. (Yedinci, sekizinci ve doku-

---

3- Bir fizikçi için "mikroskobik", çıplak gözle görülemeyecek kadar küçük şeyleri ifade eder. Bu terim bakterilerden tutun atomlara, elektronlara varıncaya kadar çok geniş bir yelpazeyi kapsar. Geniş bir büyüklük yelpazesi içerir; ama fizikçiler küçük şeyleri ifade etmek için birden fazla kelime kullanmanın kafa karıştırıcı olacağı kanısındadır.

zuncu bölümlerde göreceğiz.)

İşte bu yüzden kuantum fiziği zevkli bir mevzudur. Peki, ama köpeklerle ne ilgisi var?

Köpekler kuantum fiziğine başlarken, çoğu insandan daha iyi bir konumdadır. Dünyaya insanlar kadar önyargıyla yaklaşmazlar, her zaman da beklenmedik olanı beklerler. Bir köpek bir yıl boyunca aynı caddeden yürüyebilir ve bu her seferinde onun için yeni bir deneyim olabilir. Her taş, her çalı, her ağaç daha önce hiç koklanmamış gibi koklanacaktır.

Köpeklere verilen ödüller bir mutfağın ortasında boş uzayda aniden beliriverseydi birçok insanın ödü kopardı; ama köpekler böyle bir şey karşısında istifini bozmaz. Hatta çoğu köpek için kendiliğinden beliren ödüller hak edilmiş olur; köpekler hep ödüllerin her an, belli bir sebep olmaksızın belirivermesini bekler.

Kuantum mekaniği insanlara boğucu ve sıkıcı gelir; çünkü dünyanın işleyişiyle ilgili sağduyuya dayalı beklentilerimize karşı çıkar. Köpekler kabule daha açık dinleyicilerdir. Bir köpek için gündelik dünya tuhaf ve harika bir yerdir, kuantum kuramının öngörüleri de söz gelimi bir kapı kolunun işleyişinden daha tuhaf ya da harika değildir.[4]

Köpeğimle kuantum fiziğini tartışmak yararlı; çünkü kuantum fiziğini insanlarla nasıl tartışacağımı anlamamı sağlıyor. Kuantum mekaniğini öğrenmek kısmen bir köpek gibi düşünmeyi öğrenmektir. Dünyaya bir köpeğin baktığı gibi bakabilirseniz, onu sonu gelmez bir sürpriz ve hayret kaynağı olarak görebilirseniz kuantum mekaniği daha yaklaşılabilir görünecektir.

Bu kitapta köpeğimle kuantum fiziği hakkında yaptığım sohbetleri yeniden ürettim. Her sohbetin ardından, konuyla ilgilenen insan okurlara yönelik, anlatılan fizikle ilgili ayrıntılı bir tar-

4- Kapı kolu da kuşkusuz fizik kurallarına uygun işler; ama nihayetinde parmakların kullanılmasını gerektirir.

tışma geliyor. Konular, parçacık-dalga ikilemi (birinci bölüm), belirsizlik ilkesi (ikinci bölüm) gibi birçok kişinin duymuş olduğu fikirlerden sanal parçacıklar ve kuantum elektrodinamiği (dokuzuncu bölüm) gibi daha ileri fikirlere doğru uzanan bir yelpazeye dağılıyor. Bu açıklamalar hem kuramın tuhaf tahminlerini (gerek uygulamayla ilgili gerek felsefi) hem bu tahminleri gösteren deneyleri tartışıyor. Köpeklerin en ilginç bulduğu şeylerden seçildiler, insanların da şaşırtıcı bulabileceği kısımları aydınlatıyorlar.

"Bilmem. Bence… bence biraz daha şey… şey lazım."

"Ne lazım?"

"Benim hakkımda biraz daha fazla şey. Benim istisnai derecede akıllı bir köpek olduğumdan bahsetmiyorsun."

"Eh, peki…"

"İstisnai derecede sevimli olduğumdan da."

"Kesinlikle, ama…"

"İyi olduğumu da unutma. Öbür köpeklerden kat kat iyiyim."

"Hangi öbür köpekler?"

"Ben olmayan köpekler."

"Bak, bu gerçekten de fizik hakkında bir kitap, senin hakkında değil."

"Evet, ama daha fazla benim hakkımda olmalı, benim bütün söylediğim de bu zaten."

"Ama öyle değil, senin de buna ayak uydurman gerek."

"Eh, iyi o zaman. Ama fizik mevzuunda bana ihtiyacın olacak."

"Ne demek istiyorsun?"

"Eh, bazen bazı şeyleri dışarıda bırakıyorsun, sorularımın da hepsini yanıtlamıyorsun. Böyle yapmamalısın."

"Nasıl mesela? Bir örnek ver."

"Hmm… Şimdi aklıma gelmiyor. Ama bana okursan gösteririm ve halletmene yardım ederim."

"Peki, kulağa hoş geliyor. Bak şöyle yapalım: Birlikte kitabın üzerinden geçelim, bazı şeyleri dışarıda bıraktığımı düşündüğün yerler olursa üstüne konuşabiliriz ve ben de senin yorumlarını kitaba koyarım."

"Şimdi yaptığımız gibi mi konuşacağız?"

"Evet, şimdi yaptığımız gibi."

"Konuşmamızı kitaba koyacaksın, öyle mi?"

"Evet, koyacağım."

"O zaman ne kadar iyi, ne kadar sevimli olduğumdan da bahsetmeliyiz, daha fazla ödül almam gerektiğinden ve…"

"Peki, tamam, bu kadar yeter."

"Şimdilik."



I

Hangi Yoldan? İkisinden de: Parçacık-Dalga İkilemi



Yürüyüş yapıyoruz; köpeğim bir sincap görünce alıp başını onun peşine düşüyor. Sincap bir bahçeye kaçıp bodur bir süs akçaağacının arkasına sıvışıyor. Emmy yolunu en ufak bir biçimde değiştirmiyor; ağaca bindirmesine ramak kalmışken onu çekiyorum.

"Bunu neden yaptın?" diye hiddetle soruyor.

"Ne demek istiyorsun? Ağaca çarpacaktın, seni durdurdum."

"Hayır, çarpmayacaktım." Bahçe duvarının öbür tarafında artık daha büyük bir ağacın tepesine çıkmış olan sincaba bakıyor. "Kuantum yüzünden."

Yeniden yürümeye başlıyoruz. "Peki, ama bunu açıklaman gerek," diyorum.

"Bak, şöyle bir planım vardı," diyor. "Bilirsin, arka bahçede tavşanları kovalarken göletin sağına koştuğumda onlar sola koşup kaçarlar ya?"

"Evet."

"Ben göletin soluna koştuğumda da onlar sağa koşup kaçarlar?"

"Evet."

"Pekâlâ, ben de yeni bir koşma biçimi düşündüm, artık kaça-

mayacaklar."

"Ne? Göletin ortasından mı koşacaksın?" Gölet sadece 15-16 santim derinliğinde ve bir-iki metre uzunluğunda.

"Hayır şapşal. Her iki yoldan da gideceğim. Tavşanları benim aramda sıkıştıracağım."

"Hı hı... Ilginç... İlginç bir teori."

"Bu bir teori değil, kuantum fiziği. Madde parçacıklarının dalga niteliği vardır ve nesnelerin etrafında kırılabilirler. Bir engelin üzerine bir elektron huzmesi gönderirsen, aynı anda engelin hem sağından hem solundan geçecektir." Gerçekten de meseleyi kapıyor, caddenin karşısındaki bahçede güneşlenen kediyi fark etmiyor bile. "İşte, bu yüzden ben de dalga niteliğimi kullanacağım ve göletin her iki tarafından da gideceğim."

"İyi de bir ağaca bodoslama dalmak nereden çıkıyor?"

"Ah, evet." Biraz ahmak bir hali var. "Önce biraz küçük bir şey üzerinde denemem gerektiğini düşündüm. Koşuya güzel bir başlangıç yapmıştım, beni durduğunda tam hem sağa hem sola gitmek üzereydim."

"Ha şu mesele. Söylemiştim, ilginç bir teori. Işe yaramaz, biliyorsun."

"Benim dalga niteliğim olmadığını iddia etmeyeceksin herhalde, değil mi? Çünkü var. Senin fizik kitaplarında öyle diyor."

"Hayır, hayır. Dalga niteliğin var, onda bir sorun yok. Buda niteliğin de var."

"Aydınlanmış bir köpeğim ben!"

"Bu da senin çok işine yarayacak. Bak şimdi, ağaç büyüktür, senin dalga boyun da küçük. Yürüme hızında, senin gibi yirmi kiloluk bir köpeğin yaklaşık 10^{-35} metrelik bir dalga boyu vardır. Ikiye ayrılıp etrafını dolaşabilmek için dalga boyunun ağacın boyuna uygun, belki on santim olması gerekir; oysa sen bundan 34 kat daha büyüksün."

"Eh, ben de momentumumu değiştirerek dalga boyumu de-

ğiştiririm. Çok hızlı koşabilirim."

"İyi atış, ama hızlanırsan dalga boyun *kısalır*. Dalga boyunu yaklaşık bir milimetreye çıkarmak ve ağacın etrafını ikiye ayrılarak dolaşabilmek için saniyede 10^{-30} metre hızla hareket ediyor olman lazım, bu da inanılmaz derecede yavaştır. Bu hızla bir atomun çekirdeğini aşmak bir milyar yıl alabilir; bir tavşanı yakalamak için çok çok yavaş."

"Yeni bir plana ihtiyacım olduğunu mu söylüyorsun?"

"Yeni bir plana ihtiyacın var."

Kuyruğu düşüyor, birkaç saniye sessizlik içinde yürüyoruz. "Hey" diyor, "Yeni planımda bana yardımcı olur musun?"

"Denerim."

"Aynı anda göletin her iki tarafından da geçmek için Buda niteliğimi nasıl kullanırım?"

Söyleyecek bir şey bulamıyorum, tam o sırada gri bir kürk parıltısı imdadıma yetişiyor. "Bak! Bir sincap!" diyorum.

"Ooo!" İşte yine takipteyiz.

Kuantum fiziğinin birçok tuhaf ve büyüleyici yönü vardır; ama kuramı başlatan keşif, parçacık-dalga ikilemi; daha doğrusu, hem ışığın hem maddenin aynı anda hem parçacık benzeri hem dalga benzeri özelliklere sahip olması olmuştur. Genelde bir dalga olduğu düşünülen bir ışık huzmesinin bazı deneylerde bir parçacık akışı gibi davrandığı ortaya çıkmıştır. Genelde bir parçacık akışı olduğu düşünülen bir elektron huzmesinin de bazı deneylerde dalga gibi davrandığı anlaşılmıştır. Parçacık ve dalga özellikleri birbirine ters düşüyormuş gibi görünmektedir; gelgelelim evrende her şey bir şekilde hem dalga hem parçacık olmayı becermektedir.

Işığın bir parçacık gibi davrandığının 1900'lerin başlarında keşfedilmesi, bütün kuantum mekaniğinin başlangıç noktası oldu. Bu bölümde, fizikçilerin bu tuhaf ikiliği keşfetmelerinin ta-

rihini anlatacağız. Fakat bunun ne kadar tuhaf bir gelişme olduğunu değerlendirebilmek için gündelik hayatta gördüğümüz parçacıklar ve dalgalardan bahsetmemiz gerekiyor.

Çevrenizdeki Parçacıklar ve Dalgalar: Klasik Fizik

Maddi parçacıkların davranışına herkes aşinadır. Çevrenizde gördüğünüz nesnelerin hayli büyük bir bölümü; kemikler, toplar, gıcırtılı oyuncaklar klasik anlamda parçacık gibi davranır; hareketleri klasik fizikle belirlenir. Şekilleri farklıdır; fakat her birinin bir kütlesi olan küçük, özelliksiz bir top, bir parçacık olduğunu hayal ederek ve Newton'ın[1] hareket kanunlarını uygulayarak asli hareketlerini tahmin edebilirsiniz. Bir tenis topu ve havada taklalar atan uzun bir kemik, uçuş sırasında birbirinden farklı görünür; ama aynı yöne aynı hızla fırlatıldıklarında aynı yere inecekler dir ve siz, klasik fizik kurallarına başvurarak bu yeri kestirebilirsiniz.

Parçacık benzeri bir nesnenin belli bir konumu vardır (tam olarak nerede olduğunu bilirsiniz), belli bir yönlü hızı vardır (hangi yöne hangi hızla hareket ettiğini bilirsiniz) ve belli bir kütlesi vardır (ne kadar büyük olduğunu bilirsiniz). Kütle ve yönlü hızı çarparak momentumu bulabilirsiniz. Kocaman bir Labrador retriever'ın momentumu onunla aynı hızda yol alan kü-

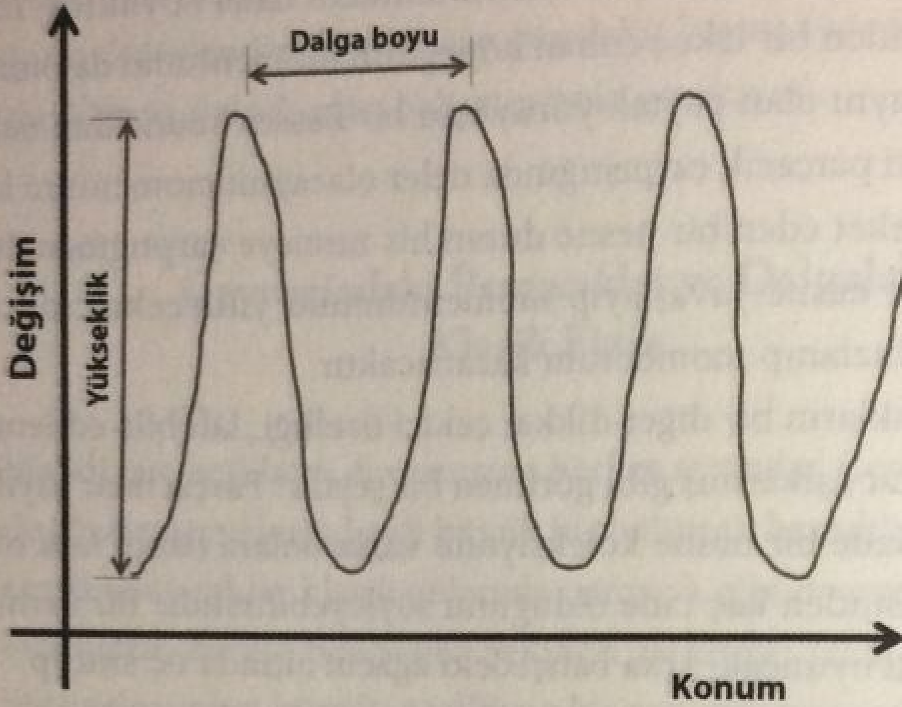
1- Yere düşen elma hikâyesindeki Sir Isaac Newton, hareket eden nesnelerin davranışlarına hükmeden üç hareket kanunu ortaya koymuştur. İlki süredurum ilkesidir: Dışarıdan bir kuvvet uygulanmadığı sürece duran nesneler durma, hareket eden nesnelerse hareket etme eğilimindedir. İkinci kanun ilkini niceliksel hale getirir ve genellikle *F=ma* denklemi şeklinde yazılır: Kuvvet eşittir, kütle çarpı ivme. Üçüncü kanun, her eylemin eşit bir karşı eylem, tepki; ters yönde, aynı ölçüde güçlü bir kuvvet doğurduğunu söyler. Bu üç kanun, gündelik hızlarda makroskobik nesnelerin hareketini belirler ve klasik fiziğin çekirdeğini oluşturur.

çük bir Fransız kanişinin momentumundan daha büyüktür; hızlı hareket eden bir İskoç çoban köpeğinin momentumu da onunla kütlesi aynı olan paytak yürüyüşlü bir Basset hound'dan daha fazladır. İki parçacık çarpıştığında neler olacağını momentum belirler. Hareket eden bir nesne duran bir nesneye çarptığında, hareket eden nesne yavaşlayıp momentumunu yitirecektir; duran nesneyse hızlanıp momentum kazanacaktır.

Parçacıkların bir diğer dikkat çekici özelliği, lafı bile edilemeyecek kadar aşikârmış gibi görünen bir şeydir: Parçacıklar sayılabilir. Elinizde bir nesne koleksiyonu varsa onlara bakıp tam olarak hangisinden kaç tane olduğunu söyleyebilirsiniz: Bir kemik, iki gıcırtılı oyuncak, arka bahçedeki ağacın altında üç sincap.

Oysa dalgalar daha ele geçmezdir. Bir dalga, bir şeyin içinde hareket eden karışıklıktır; tıpkı arka bahçedeki göletin içinde suyun çalkalanmasıyla oluşan tepe ve çukur örüntüleri gibi. Dalgalar doğaları gereği uzayın bir bölgesine yayılırlar; zaman içinde değişen ve hareket eden bir örüntü oluştururlar. Bir yere giden fiziksel bir nesne yoktur; su göletin içinde kalır; fakat karışıklık örüntüsü değişir ve biz de bunu bir dalganın hareketi olarak görürüz.

Bir dalgayı anlamak istiyorsanız, yararlı bir bilgi edinecek şekilde ona bakmanın iki yolu vardır. Biri koca bir dalganın fotoğrafını çektiğinizi düşünmek ve uzamdaki karışıklık örüntüsüne bakmaktır. Tek bir basit dalgada, düzenli bir tepeler ve çukurlar örüntüsü görürsünüz, bunun gibi:



Örüntüde ilerlerseniz, ortamın, dalganın "büyüklüğü" denen miktarda aşağı yukarı inip çıktığını görürsünüz. Birbirine komşu iki dalga tepesi (ya da çukuru) arasındaki uzaklığı ölçtüğünüzde "dalga boyu"nu ölçmüş olursunuz ve bu da bir dalgayı betimlemekte kullanılan rakamlardan biridir.

Yapabileceğiniz diğer şey küçük bir parça dalga örüntüsüne bakmak ve onu uzun bir süre izlemektir; bir gölde dalıp çıkan bir ördeği izlediğinizi düşünün. Dikkatle izlerseniz karışıklığın çok düzenli bir biçimde büyüyüp küçüldüğünü, ördeğin bazen yükselip bazen de alçaldığını, zamanla uzamdaki örüntüye çok benzer bir örüntü oluşturduğunu görürsünüz. Dalganın belli bir süre zarfında ne kadar sıklıkla kendini tekrarladığını, ördeğin bir dakika içinde azami yüksekliğe kaç kere ulaştığını ölçebilirsiniz; bu size dalganın "frekansı"nı verir. Frekans da dalgayı tanımlarken kullanılan bir başka önemli rakamdır. Dalga boyu ve frekans birbiriyle ilişkilidir; uzun dalga boyu düşük frekans, kısa dalga boyu yüksek frekans anlamına gelir.

Dalgaların parçacıklardan nasıl farklı olduğunu artık görebili-

yorsunuzdur: Dalgaların konumu yoktur. Dalga boyu ve frekans bir bütün olarak örüntüyü betimler; ama dalganın *konumu* olarak gösterip tanımlayabileceğiniz tek bir yer yoktur. Dalganın kendisi uzaya yayılmış bir karışıklıktır; belli bir konumu ve yönlü hızı olan fiziksel bir şey değildir. Dalganın tepelerinden birinin, bir konumdan diğerine hareket etmesinin ne kadar sürdüğüne bakarak dalga örüntüsüne bir yönlü hız atfedebilirsiniz; fakat yine de bu bir bütün olarak örüntünün özelliğidir.

Ayrıca parçacıkları sayabildiğiniz gibi dalgaları sayamazsınız; belli bir bölgede dalganın kaç tepesi ve çukuru olduğunu söyleyebilirsiniz; fakat bunların hepsi de tek bir dalga örüntüsünün parçalarıdır. Dalgalar sürekli, parçacıklar birbirinden ayrıdır; bir, iki ya da üç parçacığınız olduğunu söyleyebilirsiniz; ama dalga ya vardır ya yoktur. Tek tek dalgaların yükseklikleri büyük ya da küçük olabilir; ama dalgalar parçacıklar gibi gruplar halinde değildir; bazen iki dalgayı bir araya getirdiğinizde karşınıza daha büyük bir dalga çıkar, bazen de hiç dalga olmaz.

Aynı bölgede iki farklı dalga kaynağı olduğunu düşünün; örneğin durgun suya aynı anda iki taş atılmış olsun. İki dalgayı birbirine eklerseniz ne elde edeceğiniz dalgaların nasıl sıralandığına bağlıdır. İki dalgayı birinin tepelerinin diğerinin tepelerinin üstüne, birinin çukurlarının diğerinin çukurlarının üstüne geleceği şekilde yerleştirirseniz (bu tür dalgalara "aynı fazda" denir) başlangıçtaki iki dalgadan daha büyük bir dalga elde edersiniz. Öte yandan, dalgalardan birini tepeleri diğerinin çukurlarının üstüne gelecek şekilde ya da çukurları diğerinin tepelerinin üstüne gelecek şekilde yerleştirirseniz ("zıt fazlı") ikisi birbirini iptal edecek, sonuçta elinizde hiç dalga olmayacaktır.

Bu fenomene girişim denir; girişim dalgalar ve parçacıklar arasındaki belki de en önemli farklılıktır.

"Bilmem... Bu çok tuhaf. Başka girişim örnekleri var mı gösterebileceğin? Biraz daha... Ne bileyim, köpeksi bir örnek?"

"Hayır, gerçekten de yok. Mesele de bu zaten; dalgalar parçacıklardan çok çok farklıdır. Köpeklerin düzenli olarak uğraştığı hiçbir şey dalga benzeri değildir."

"Peki, şuna ne dersin? Arka bahçeye bir sincap koyuyorsun, sonra bir de köpek; bir dakika sonra arka bahçede hiç sincap olmuyor, böyle bir 'girişim' olamaz mı?"

"O girişim değil, av takibi. Bak, girişim daha ziyade şöyle bir şey: Arka bahçeye bir sincap koyuyorsun, bir saniye sonra bir sincap daha koyuyorsun, sonra bir bakıyorsun hiç sincap yok; ama ikinci sincabı koymadan önce *iki* saniye beklersen, dört tane sincap buluyorsun."

"Anlaşıldı, bu gerçekten de tuhaf."

"Benim demek istediğim de bu."

"Eh, peki o halde. İyi iş çıkarmışsın. Ama biz neden bunu konuşuyoruz?"

"Çünkü kuantum fiziğini anlayabilmen için dalgalar hakkında birkaç şey bilmen gerekiyor."

"Evet, ama bu bana matematikmiş gibi geliyor. Matematiği sevmem. Fizikten ne zaman bahsedeceğiz?"

"Fizikten bahsediyoruz. Fiziğin bütün amacı, evreni betimlemek için matematiği kullanmaktır."

"Evreni betimlemek istemiyorum. Sincap yakalamak istiyorum."

"Bak, evreni matematikle nasıl betimleyebileceğini bilmen sincap yakalamanı sağlayabilir. Sincapların nerede olduğuna ilişkin matematiksel bir modelin varsa, onların davranışlarını yöneten kuralları biliyorsan modelini sincapların bundan sonra nerede olacağını tahmin etmekte kullanabilirsin. Nerede olacaklarını tahmin edersen de..."

"Sincapları yakalayabilirim!"

"Aynen öyle."

"Peki, tamam. Matematiğe eyvallah. Yine de bu dalga mesele-

sinin neye yaradığını anlayamadım."

"Işık ve ses dalgalarının özelliklerini açıklamamız gerekiyor, sırada o var."

Gündelik Hayatta Dalgalar: Işık ve Ses

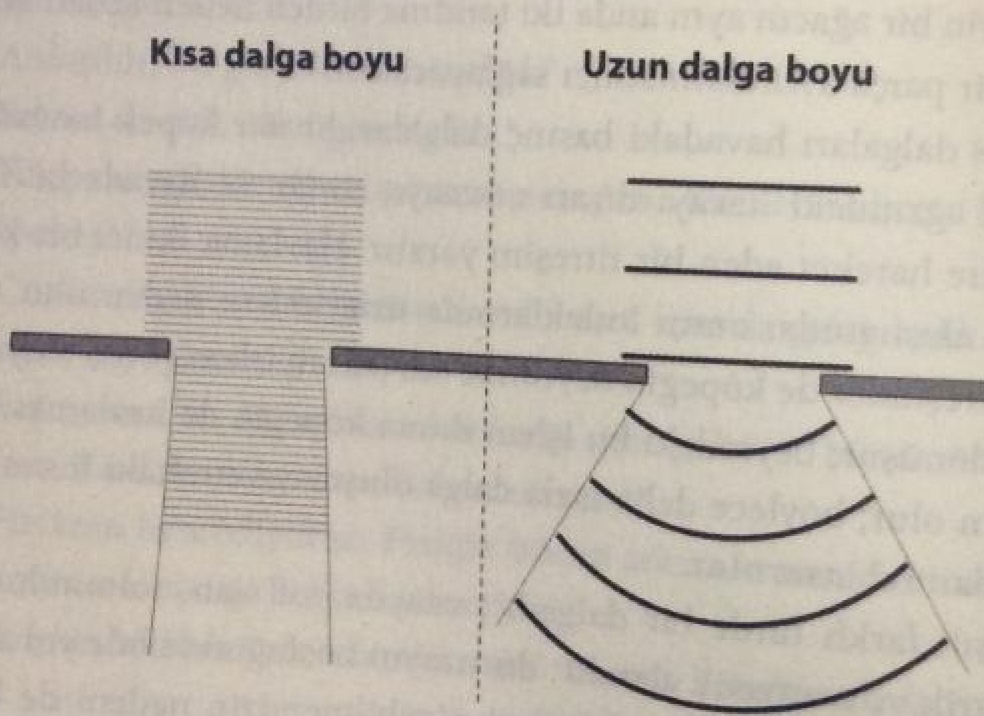
Gündelik hayatta iki tür dalgayla uğraşırız: ışık ve ses. İkisi de dalga fenomeninin örnekleri olsalar da görünüşe bakılırsa çok farklı davranışlar göstermektedirler. Bu farklılıkların sebebi köpeklerin bir ağacın aynı anda iki tarafına birden neden koşamadığını bir parça aydınlatmamızı sağlayacaktır.

Ses dalgaları havadaki basınç dalgalarıdır. Bir köpek havladığında ağzındaki havayı dışarı çıkmaya zorlar ve havada bütün yönlere hareket eden bir titreşim yaratır. Havlama ikinci bir köpeğe ulaştığında, onun kulaklarında titreşimlere neden olur ve bu titreşimler de köpeğin beyninde ses olarak işlem gören sinyallere dönüşür; beyindeki bu işlem ikinci köpeğin de havlamasına neden olur; böylece daha fazla dalga oluşur ve etraftaki insanlar bundan rahatsız olur.

Işık farklı türde bir dalgadır; uzayda yol alan, salınımlı bir elektrik ve manyetik alandır; dış uzayın boşluğunda bile yol alır, uzaktaki yıldızları ve galaksileri görebilmemizin nedeni de budur. Işık dalgaları gözünüzün arka kısmına vurduklarında beyinde sinyallere dönüşüp işlenerek etrafınızdaki dünyanın bir görüntüsünü oluştururlar.

Gündelik hayatta ışık ile ses arasındaki en önemli farklılık, bir engelle karşılaştıklarında neler olduğuyla ilgilidir. Işık dalgaları sadece düz hatlar üzerinde yol alır; ses dalgalarıysa engellerin etrafında bükülüyormuş gibi görünmektedir. Yemek odasındaki bir köpeğin, görmese bile mutfakta bir patates cipsinin yere düştüğünü duymasının sebebi budur.

Ses dalgalarının köşeleri dönmesi bir kırılma örneğidir; bir engelle karşılaşan dalgaların başlıca özelliği budur. Bir dalga, açıklığı olan bir engelle, örneğin mutfaktan yemek odasına açılan bir kapının bulunduğu bir duvarla karşılaştığında açıklıktan geçen dalgalar dümdüz gitmeye devam etmez, farklı yönlere dağılırlar. Ne kadar çabuk dağıldıkları dalganın dalga boyuna ve içinden geçtikleri açıklığın büyüklüğüne bağlıdır. Açıklık dalga boyundan çok daha büyükse çok az bir bükülme olacaktır; ama açıklığın büyüklüğü dalga boyununkine yakınsa dalgalar olabilecek her yöne tam anlamıyla dağılacaktır.



Solda dalga boyu kısa olan bir dalga, dalga boyundan çok daha büyük bir açıklıkla karşılaşır ve dalgalar az çok düz bir biçimde yollarına devam eder. Sağda, dalga boyu uzun bir dalga, dalga boyuna yakın büyüklükte bir açıklıkla karşılaşır; dalgalar çok geniş bir yelpazede ayrılıp çeşitli yönlere dağılır.

Aynı şekilde, ses dalgaları bir sandalye ya da ağaç gibi bir engelle karşılaştıklarında, nesnenin dalga boyundan çok büyük olmaması halinde engelin etrafında kırılacaklardır. Havlayan bir

köpeğin sesini boğmak için büyük bir duvara gerek olmasının sebebi budur; ses dalgaları küçük nesnelerin etrafında bükülür ve o nesnelerin arkalarındaki insanlara ya da köpeklere ulaşır.

Havadaki ses dalgalarının dalga boyu yaklaşık bir metredir; gündelik nesnelerin, kapıların, pencerelerin, mobilyaların boyutuna yakındır. Sonuçta dalgalar büyük ölçüde kırılır; sert köşelerin ardından bile sesleri duyabilmemizin sebebi budur.

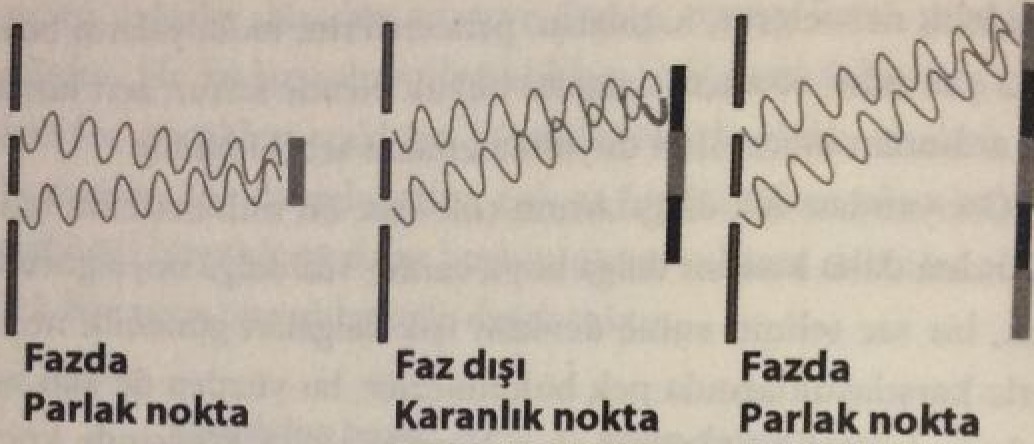
Öte yandan ışık dalgalarının çok kısa, bir milimetrenin binde birinden daha kısa bir dalga boyu vardır. Yüz dalga boyu görünür ışık, bir saç telinin enine denktir. Işık dalgaları gündelik nesnelerle karşılaştıklarında pek bükülmezler; bu yüzden de katı nesnelerin karanlık gölgeleri olur. Nesnenin tam köşesinde küçük bir kırılma olur; gölgelerin kenarlarının hep belli belirsiz olması bu yüzdendir. Ama çoğunlukla ışık düz bir hat üzerinde yol alır; görünür hiçbir kırılma olmaz.

Işığın bir dalga gibi kırıldığını görmediysek bir dalga olduğunu nereden biliyoruz? Işığın gündelik nesnelerin etrafında kırıldığını görmeyiz; çünkü bu nesneler ışığın dalga boyuna kıyasla çok büyüktür. Fakat yeterince küçük bir engele bakarsak ışığın dalga gibi davrandığını yanılgıya yer bırakmaksızın gösteren kanıtlarla karşılaşırız.

1799'da Thomas Young adında İngiliz bir fizikçi ışığın dalga niteliğine sahip olduğunu gösteren belirleyici deneyi gerçekleştirdi. Young bir ışık huzmesinin önüne, üzerinde çok dar iki yarık olan bir kart yerleştirdi. Kartın ötesine baktığında iki yarık görüntüsü yerine, birbirine karışmış aydınlık ve karanlık noktalardan oluşan büyük bir örüntü gördü.

Young'ın çift yarık deneyi, ışık dalgalarının kırılması ve girişimini açıkça gösterir. Yarıkların her birinden geçen ışık çok farklı yönlere ayrılır ve iki yarıktan geçen dalgalar örtüşür. Herhangi bir noktada, iki yarıktan geçen dalgalar farklı mesafeler almış, farklı sayıda salınımdan geçmiştir. Aydınlık noktalarda iki dal-

ga aynı fazdadır; birbirlerine eklenmişlerdir, yarıkların her birinden gelen ışıktan daha parlak bir ışık verirler. Karanlık noktalardaysa dalgalar zıt fazdadır ve birbirlerini ortadan kaldırmışlardır.



Çift yarık kırılmasının bir tablosu. Solda iki farklı yarıktan gelen dalgalar tam olarak aynı mesafeyi kat eder ve aynı faza girerek parlak bir nokta oluşturur. Ortada, aşağıdaki yarıktan gelen dalga, fazladan bir yarım dalga boyu (rengi daha koyu olan çizgi) daha yol kat eder ve yukarıdaki yarıktan gelen dalgayla zıt fazda olur. İki dalga birbirini iptal eder ve örüntüde karanlık bir nokta oluşturur. Sağda, aşağıdaki yarıktan gelen dalga fazladan tam bir dalga boyu daha yol alır ve yukarıdaki yarıktan gelen dalgayla aynı faza girip parlak bir nokta oluşturur.

Young'ın deneyinden önce, ışığın doğası hakkında hararetli bir tartışma yapılıyordu; bazı fizikçiler ışığın dalga olduğunu, Newton da dahil bazılarıysa ışığın küçük parçacıklardan oluşan bir akış olduğunu iddia ediyordu. Fakat girişim ve kırılma sadece dalgalarda olan fenomenlerdir; bu yüzden de Young'ın deneyinin (ve Fransız fizikçi Augustin Fresnel'in yaptığı sonraki deneylerin) ardından herkes ışığın dalga olduğuna ikna oldu. İşler yaklaşık yüzyıl böyle kaldı.



"Bunun ağacın iki tarafına birden geçmekle ne ilgisi var acaba? Ben yarıklardan geçmekle ilgilenmiyorum. Tavşan yakalamak istiyorum."

"Bir ışık huzmesinin yoluna küçük katı engeller koyduğunda da aynı temel süreç işler. Nesnenin sol tarafından geçen ışıkla, sağ tarafından geçen ışığı iki farklı yarıktan geçen dalgalar olarak düşünebilirsin. Hedeflerine farklı yollardan varırlar; bu yüzden de vardıklarında aynı fazda ya da zıt fazda olabilirler. Yarıkları kullandığında olduğu gibi aydınlık ve karanlık noktalardan oluşan bir örüntü görürsün."

"A, tamam, sanırım anladım. Yani tavşanların, kendimle aynı fazda olacağım noktalarda durmasını sağlamam gerek, ha?"

"Hayır, öyle değil, dalga boyu meselesi yüzünden. Birazdan o konuya geleceğim. Ama önce parçacıklardan bahsetmem gerek."

"Peki, sabredebilirim. Çok uzun olmayacaksa tabii."

Kuantumun Doğuşu: Parçacık Olarak Işık

Işığın dalga modeliyle ilgili ilk soru işareti 1900'de Max Planck adlı Alman bir fizikçiden geldi. Planck, bütün nesnelerin yaydığı termal radyasyon üzerinde çalışıyordu. Sıcak nesnelerin ışık salması çok sıradan bir fenomendir (en bilinen örneği de kızgın bir metal parçasının kızıl ışıltısıdır), bu kadar sıradan bir şeyin kolayca açıklanması gerekirmiş gibi görünüyordu. Fakat 1900'e gelindiğinde, farklı renklerde ne kadar ışık salındığı meselesi (ışığın "tayfı") o zamana dek 19. yüzyılın en iyi fizikçilerinin bileğini bükmüştü.

Planck, tayfın çok özel bir şekli olduğunu; düşük frekanslarda çok fazla, yüksek frekanslarda çok az ışık salındığını; tayfın zirve noktasının, yani salınan ışığın en parlak olduğu frekansın sadece nesnenin sıcaklığına bağlı olduğunu biliyordu. Tayfın şekli-

ni betimlemesini sağlayacak bir formül bile keşfetmişti; fakat formülü kuramsal olarak geçerli kılmaya çalıştığında duvara tosladı. Denediği her yöntem, yüksek frekanslarda gözlenenden daha fazla ışık olması gerektiği tahminini doğuruyordu. Ümitsizlik içindeki Planck, doğru cevabı bulabilmek için matematiksel bir numaraya başvurdu.

Planck'ın numarası, bütün nesnelerin ancak belli frekanslarda ışık salan kurgusal "osilatörleri" olduğunu düşünmekti. Sonra, basit bir formül gereği, osilatörlerin her biriyle ilişkili enerji miktarının (E), salımın frekansıyla ilgili olduğunu söyledi:

$$E= hf$$

Bu formülde *h* sabitti. Planck bu tuhaf varsayımı ilk geliştirdiğinde bunu sadece problemi kurmak için kullanacağını, sonra sıradan bir matematiksel teknikle bu hayali osilatörlerden ve fazladan *h* sabitinden kurtulacağını düşünmüştü. Gelgelelim çok büyük bir şaşkınlıkla, vardığı sonuçların ancak osilatörleri yerli yerinde tuttuğunda ve *h*'nin sıfır değil de çok küçük bir miktar olması halinde anlamlı olabileceğini gördü.

Bugün *h*, onun şerefine Planck sabiti olarak bilinir ve değeri de $6,626 \text{ X } 10^{-31}$ kg m^2 / sn'dir (yani 0, 00000000000000000000 0000000000006626 kg m^2 / sn). Gerçekten de çok küçük bir rakamdır, ama sıfır değildir.

Planck'ın numarası, fizikçilerin sürekli bir dalga olarak düşündüğü ışığı, parçacıklar gibi ayrı istifler halinde geliyormuş gibi ele almaya varıyordu. Planck'ın "osilatörleri" ancak ayrı parçalık birimleri olarak ışık salıyorlardı. Bu biraz dalgaların sadece bir, iki ya da üç santimetre olabileceği, asla bir buçuk ya da iki çeyrek santim olamayacağı bir gölet düşünmeye benzer. Gündelik dalgalar bu şekilde işlemez; ama Planck'ın matematiksel modelinin gerektirdiği şey buydu.

"Kuantum fiziği"nin "kuantum"u da bu "osilatör"lerden ge-

lir. Planck osilatörlerin özgül enerji seviyelerine "kuanta" demişti. ("Kuanta", Latince "ne kadar" anlamına gelen "kuantum" sözcüğünün çoğuludur.) Belli bir frekanstaki osilatör bir kuantum (bir birim enerji, *hf*), iki kuanta, üç kuanta vb. içerebilir; ama asla bir buçuk ya da iki çeyrek kuanta içeremez. Bu basamakların ismi yerleşmiş; Planck'ın çaresizce başvurduğu numaradan gelişen koskoca bir kuramın adı olmuştur.

Planck sıklıkla, ışık kuantası fikrini icat etmiş olmakla anılsa da kendisi ışığın ayrı kuantalar halinde geldiğine hiç inanmadı ve her zaman birinin, kendisinin geliştirdiği formülü hiçbir numaraya başvurmadan türetmenin akıllıca bir yolunu bulabileceğini umdu.

Bir kuantum parçacığı olarak ışıktan ciddi olarak bahseden ilk kişi 1905'te Albert Einstein oldu; Einstein bunu fotoelektrik etkiyi açıklamakta kullanmıştı. Fotoelektrik etki de açıklaması basit olmalıymış gibi görünen bir başka fiziksel etkidir: Bir parça metalin üzerine ışık tuttuğunuzda, metalden elektron çıkar. Basit ışık sensörlerinin ve hareket detektörlerinin temelini bu oluşturur: Bir sensörün üzerine düşen ışık metalden elektron çıkarır, sonra bu elektronlar bir devrenin içinden geçer. Sensöre vuran ışık miktarı değiştiğinde, devre bir eylem gerçekleştirir: Ortalık karardığında ışıkları yakmak gibi ya da sensörün önünden bir köpek geçerken kapıyı açmak gibi.

Işığı, mama torbasını içindekiler mutfağın her tarafına saçılıncaya kadar sallayan bir köpek misali, elektronlar çıkıncaya kadar atomları ileri geri sallayan bir dalga olarak düşünerek fotoelektrik etkiyi kolayca açıklayabilmemiz gerekir. Fakat maalesef, bu dalga modelinin tamamen yanlış olduğu görülür: Model, atomlardan ayrılan elektronların enerjisinin ışığın yoğunluğuna bağlı olması gerektiği tahmininde bulunur; ışık ne kadar parlak olursa sarsma o kadar şiddetli olacak ve parçacıklar o kadar hızlı uçuşacaktır. Fakat deneylerde elektronların enerjisinin ışığın yoğunlu-

ğuna bağlı olmadığı görülmüştür. Enerji, yoğunluk yerine, dalga modelinin önemli olmaması gerektiğini söylediği frekansa bağlıdır. Düşük frekansta, ne kadar sert sarsarsanız sarsın hiç elektron çıkaramazsınız, yüksek frekanstaysa hafif bir sarsma bile epey enerjisi olan elektronlar elde etmeye yeterlidir.



"Fizikçiler aptal."

"Efendim?"

"Yani, *bu dediğini* her köpek bilir. İçinde mama olan bir torba alırsan hep olabildiğince hırslı sallarsın. Mamayı böyle dışarı çıkarırsın çünkü."

"Eh, peki, öyle olsun, ne diyebilirim ki? Köpekler kuantum fiziğini mükemmel bir sezgiyle kavrıyor."

"Teşekkürler. Biz de sevimliyizdir."

"Tabii, ama fiziğin amacı mamanın *neden* çıktığı gibi çıktığını anlamaktır."

"Size göre öyle olabilir. Köpeklere göre amaç mamayı almaktır."

Einstein fotoelektrik etkiyi Planck'ın formülünü ışığın kendisine uygulayarak açıkladı. Bir ışık huzmesini, bir küçük parçacıklar akışı olarak betimledi; parçacıkların her biri Planck sabitinin ışık frekansıyla çarpımına eşit bir enerjiye sahipti (aynı kural Planck "osilatörleri" için de geçerlidir). Her fotonun (artık bu ışık parçacıklarına verilen ad) sağlayabileceği enerji miktarı, frekansa bağlı olarak sabittir; bir elektronu yerinden oynatmak için asgari bir miktar enerjiye gerek vardır. Tek bir fotonun enerjisi gerekli asgari miktardan fazlaysa elektron yerinden oynayacak ve fotonun geri kalan enerjisini yüklenecektir. Frekans ne kadar yüksek olursa tek bir fotonun enerjisi o kadar yüksek olacak, elektronlar ayrılırken o kadar fazla enerjiye sahip olacaklardır. Tek bir fotonun enerjisi, bir elektronu çıkarmak için gereken

enerjiden düşükse, hiçbir şey olmaz; bu da düşük frekanslarda neden elektron çıkmadığını açıklar.[2]

Işığı bir parçacık olarak tanımlamak 1905'te son derece tartışmalı bir fikirdi; çünkü yüzyıllık bir fiziği alt üst ediyor, ışığın çok farklı bir biçimde görülmesini gerektiriyordu. Işığın, bir köpeğin tabağına dökülen su gibi sürekli bir dalga olmaktan ziyade, bir tabağa dökülen köpek maması gibi ayrı ayrı parçacıkların akışı olarak düşünülmesi gerekiyordu. Gelgelelim bu parçacıkların yine her birinin kendisiyle ilişkili bir frekansı vardır; bu frekanslar bir şekilde eklenerek tıpkı bir dalga gibi bir girişim örüntüsü oluşturur.

1905'te başka fizikçiler bu fikri derinden sorunlu buldular; Einstein'ın modelinin kabul görmesi zaman aldı. Amerikalı fizikçi Robert Milikan Einstein'ın fikrinden hiç hazzetmiyordu; 1916'da Einstein'ı haksız çıkarma umuduyla, son derece kesin sonuçlar veren bir dizi fotoelektrik etki deneyi gerçekleştirdi.[3] Aslına bakarsanız, Milikan'ın vardığı sonuçlar Einstein'ın öngörülerini doğruladı; ama bu bile foton fikrinin kabul edilmesi için yeterli olmadı. Foton tablosunun kabul edilmesi ancak 1923'te, Arthur Holly Compton'ın X ışınlarıyla yaptığı bir dizi ünlü deneyle, ışığın parçacık benzeri davrandığını yanılgıya yer bırakmayacak şekilde göstermesiyle mümkün oldu: Compton, fotonların momentuma sahip olduğunu; bu momentumun çarpışmayla diğer parçacıklara aktarıldığını gösterdi.

2- Düşük enerjili iki fotonu bir araya getirerek bir elektronu serbest bırakmaya yeterli enerjiyi neden sağlayamadığımızı merak edebilirsiniz. Bunun için, iki fotonun aynı anda aynı elektrona çarpması gerekir ve bu neredeyse hiç olmaz.

3- Milikan Einstein'ın modelinin "tatmin edici bir teorik temelden" yoksun olduğunu düşünüyor; bu modelin başarısını fizik standartlarına göre çok çirkin anlamına gelen "katıksız derecede ampirik" sözüyle niteliyordu. İroniktir, bu söz, kuramın öngörülerini sağlam bir biçimde doğruladığı makalenin ilk paragrafında geçiyordu.

Tek bir fotonun enerjisi için Planck formülünü alır, sonra bunu Einstein'ın özel görelilik denklemleriyle birleştirirseniz tek bir ışık fotonunun küçük bir miktar momentumu olduğunu bulursunuz; şu formül kullanılır:

$$p = h / \lambda$$

Momentumun sembolü p'dir; λ ise ışığın dalga boyunu gösterir.



"Bu kitapta hiç görelilik yok dedin sanıyordum."

"Ben kitap görelilik *hakkında* değil dedim. İkisi aynı şey değil. Göreliliğin bazı fikirleri kuantum fiziği açısından da önemlidir."

"İyi de göreliliğin bununla ne ilgisi var?"

"Hmm. Görelilik der ki bir fotonun enerjisi olduğu için, hiç kütlesi olmasa bile bir momentumu olması gerekir."

"Yani... Şu $E = mc^2$ meselesi mi?"

"Tam olarak değil, ama benziyor. Nasıl nesnelerin kütleleri olduğu için enerjileri varsa aynı şekilde fotonların da enerjileri olduğu için momentumları vardır. Hem aferin sana, sözlerinin arasına denklemler sıkıştırabiliyorsun."

"Aman rica ederim. Ayaktakımı köpekleri bile $E = mc^2$'yi bilir. Ben *istisnai* bir köpeğim."

Dalga boyu kısa olan bir fotonun momentumu büyüktür, dalga boyu uzun bir fotonun momentumu ise küçüktür. Bu da ışık fotonuyla durağan bir nesne arasındaki etkileşimin, iki parçacığın çarpışması gibi görüneceği anlamına gelir: Durağan nesne bir enerji ve momentum kazanır; hareket eden fotonsa enerji ve momentum kaybeder. Bunu fark etmeyiz, çünkü söz konusu momentum çok küçüktür; Planck sabiti çok küçük bir rakamdır; ama elektronlar gibi kütleleri çok küçük olan nesnelere ya da

dalga boyları çok kısa olan (dolayısıyla momentumları nispeten yüksek olan) fotonlara baktığımızda momentumdaki değişikliği tespit edebiliriz.

1923'de Compton başlangıçta dalga boyu 0,0709 nanometre[4] olan X ışınlarını katı bir hedefe çarptırdı. (X ışını dalga boyu istisnai derecede kısa ışıktır, görünür ışığın dalga boyu 500 nanometredir.) Compton hedeften saçılan X ışınlarına baktığında bunların dalga boylarının daha uzun olduğunu gördü; bu durum ışınların momentum kaybettiğini gösteriyordu. (Örneğin ilk hedeflerine çarpıp 90 derece açıyla sıçrayan X ışınlarının 0, 0733 nanometrelik bir dalga boyu vardı.) Işık parçacıksa olması gereken şey tam da böyle bir momentum kaybıdır: Bir X ışını fotonu gelir de hedefteki az çok durağan elektrona çarparsa momentumunun bir kısmını elektrona geçirir ve elektron hareket etmeye başlar. Çarpışma sonrasında fotonun momentumu daha az olacaktır; böylece dalga boyu tam da Compton'un gözlediği üzere daha uzun olacaktır.

Kaybedilen momentum miktarı, fotonun çarpıp sıçradığı açıya da bağlıdır; bir elektronu sıyırıp geçen bir foton fazla momentum kaybetmez; elektrona çarpıp geri dönense epeyce momentum kaybeder. Compton dalga boyunu birçok farklı açıdan ölçmüş; vardığı sonuçlar, kuramsal tahminlere tam bir uygunluk göstermiş; bu değişikliğin başka bir etkiden değil, elektronlarla çarpışmaktan kaynaklandığını doğrulamıştır.

Einstein, Millikan ve Compton ışığın parçacık niteliğini gösterdikleri için Nobel ödülü kazanmışlardır. Bir arada ele alındığında Millikan'ın fotoelektrik efekti deneyleri ile Compton'un çarptırma deneyleri, çoğu fizikçinin ışığın bir parçacık akımın-

---

4- 1 nanometre 10^{-9} metredir, yani bir metrenin bir milyarda biridir (0, 000000001).

dan oluştuğu fikrini kabul etmesi için yeterli olmuştur.[5]

Bir parçacık olarak ışık fikri ne kadar tuhaf olursa olsun, bundan sonra gelen şey daha da tuhaftı.

Karışan Elektronlar: Dalga Olarak Parçacıklar

Yine 1923'te, Louis Victor Pierre Raymond de Broglie[6] adında Fransız bir doktora öğrencisi radikal bir öneride bulundu: Işık ile madde arasında bir simetri olması gerektiğini, bu yüzden de elektron gibi bir madde parçacığının bir dalga boyu olması gerektiğini savunuyordu. Nihayetinde ışık dalgaları parçacık gibi davranıyorsa, parçacıkların da dalga gibi davranması gerekmiyor muydu?

De Broglie tıpkı bir fotonun, dalga boyuyla belirlenen bir momentumu olduğu gibi, elektron gibi maddi bir nesnenin de momentumuyla belirlenen bir dalga boyu olması gerektiğini ileri sürüyordu:

$$\lambda = h/p$$

5- Birkaç tutucu fizikçi, foton fikrine direnmiştir; çünkü Compton etkisi, çok karmaşık olsa da fotonlar olmadan bile açıklanabilir. Son direniş, 1977'de, Kimble, Dagenais ve Mandel'ın yaptığı, tek tek atomların saldığı ışığın incelendiği bir deneyle fotonların varlığına dair değiştirilemeyecek bir kanıt sunulduğunda çökmüştür. Einstein'ın önerisi ile bu önerinin nihayet kabul edilmesi arasında geçen yetmiş iki yıl, fizikçilerin yeni bir fikirle karşılaştıklarında gösterdikleri inatçılığa dair bir şeyler anlatmaktadır. Bir fizikçiyi sevilen bir modelden ayırmak, bir köpeği iyice çiğnenmiş bir kemikten ayırmak kadar zor olabilir.

6- Louis de Broglie'un soyadının doğru telaffuzu (isim bolluğu aristokrat geçmişini yansıtır; kendisi 7. Dük de Broglie'dur) Amerikalı fizikçiler arasında büyük bir kargaşa kaynağıdır. "De BRO-lii", "de-BRO-glii" ve "de-BROY-li" dendiğini duydum. Doğru Fransızca telaffuzsa "de-BROY"a yakındır, yalnız sesli harfi hafif gargara yapıyormuş gibi çıkarmak için Fransız olmanız gerekir.

Bir fotonun momentumunu veren formülün, fotonun dalga boyunu vermesi için tersine çevrilmesiyle oluşturulmuş bir formüldü bu. Bu fikrin matematiksel bir zarafeti vardı; 1923'te bile kuramsal fizikçiler için çekiciydi; ama tam bir saçmalık olarak görünüyordu, katı nesneler dalga gibi davranma işareti göstermez. De Broglie doktora tezinin bir parçası olarak bu fikri sunduğunda, kimse bununla ne yapılacağını bilemedi. Profesörleri ona bir derece verip vermeyeceklerine bile emin değillerdi; tezini Einstein'a gösterme çaresine başvurdular. Einstein tezin çok parlak olduğunu söyledi ve de Broglie derecesini aldı; ama dalga olarak elektron fikri, elektronların dalga olarak davrandığı 1920'lerin sonunda yapılan iki deneyle değiştirilemez biçimde kanıtlanıncaya dek pek destek görmedi.

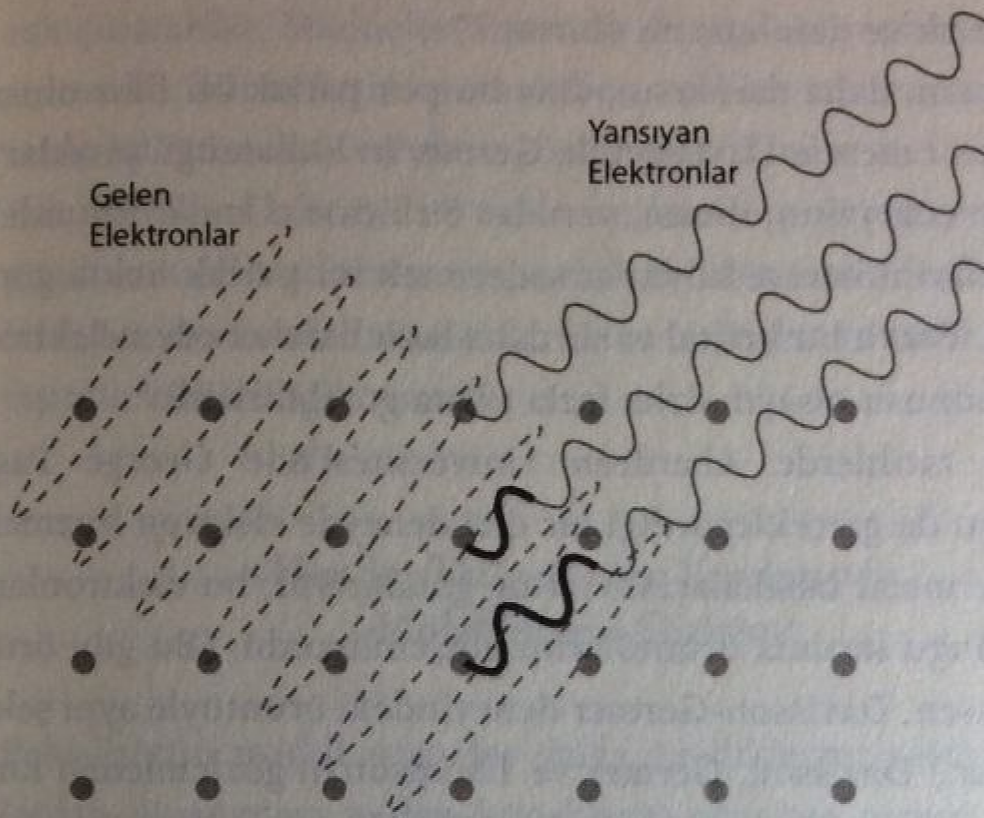
1927'de Amerikalı iki fizikçi Clinton Davisson ile Lester Germer, nikel bir yüzeye elektron çarptırıp kaç elektronun farklı açılarla sıçradığını kaydediyorlardı. Detektörleri belli bir açıda sıçrayan elektron sayısının çok fazla olduğunu gösterdiğinde şaşırdılar. Bu gizemli sonuç, elektronların dalga benzeri kırılmalarının, hedefleri olan nikel malzemede farklı atom sıralarına çarpmalarından ileri geldiği söylenerek açıklandı. Elektron huzmesi nikel içinde bir miktar yol alıyordu; huzmenin bir parçası nikel kristalinde[7] ilk sıradaki atomlara çarpıyordu; diğer parçalarıysa ikinci, üçüncü, dördüncü vs. sıralara çarpıyordu. Bu farklı atom sıralarından yansıyan elektronlar dalga gibi davranıyordu. Kristalin derinlerindeki atomlara çarpan dalgalar, yüzeyin yakınındaki atom sıralarına çarpan dalgalardan daha fazla yol alıyordu. Bu dalgalar, Young'ın deneyinde farklı yarıklardan (gerçi sadece iki değil, birçok yarık vardı) geçen ışık dalgaları gibi birbirine karı-

---

7- Kristal, bir fizikçiye, içindeki atomların düzenli bir sıralamayla bulunduğu bir katıyı ifade eder. Bu ifade, normalde bu kelimeyle ilişkilendirdiğimiz berrak ve ışıltılı şeyleri, aynı zamanda birçok metali ve başka maddeyi de içerir.

şıyordu. Çoğu kez yansıyan dalgalar zıt fazda oluyor ve birbirini iptal ediyordu. Ama bazı açılarda, alınan fazladan yol, dalgaların aynı fazda olup parlak bir nokta oluşturmasına yetecek doğru uzunlukta oluyordu; Davisson ve Germer bu parlak noktayı, o açıdan yansıyan elektron sayısında büyük bir artış olarak tespit etmişlerdi. De Broglie'un, elektrona bir dalga boyu vermeye yönelik formülü, Davisson ve Germer'in vardığı sonucu mükemmel düzeyde tahmin eder.[8]

8- İroniktir. Davisson ve Germer, aygıtlarının bir parçasını kırdıkları için başarılı olmuşlardı. Yaptıkları ilk deneylerde bir kırılma görmemişlerdi; çünkü hedefteki nikel malzeme, her biri farklı bir girişim örüntüsü üreten birçok küçük kristalden oluşuyordu; farklı örüntülerden çıkan farklı parlak noktalar da birlikte akıyordu. Sonra kazara vakum sistemlerine hava aldılar. Hasarı onarırken hedefi erittiler; tek bir büyük kristal haline gelen nikel hedef tek bir berrak kırılma örüntüsü oluşturdu. Bazen bir fizikçinin başına gelebilecek en büyük şans, önemli bir şeyi kırmasıdır.



Elektronların bir nikel kristaline çarpıp kırılmaları. Gelen bir elektron huzmesi (kesintili çizgi), düzgün bir atom kristalinin içine girer ve kristaldeki farklı atomlardan dalga parçacıkları (tek tek elektronlar) yansır. Kristalin derinlerinden yansıyan elektronlar dışarı çıkarken daha uzun bir mesafe alırlar (koyu çizgiler); ama bazı açılardan bu mesafe tam bir dalga boyunun toplamıdır ve kristalden ayrılan dalgalar aynı fazda olup Davisson ile Germer'in gördüğü parlak noktayı oluşturur.



"Bir dakika, bir dakika, nasıl oluyor bu? Bir sürü yarık olursa bir sürü parlak nokta olması gerekmez mi?"

"Pek sayılmaz. Dalgaları birbirine eklersen yine parlak ve karanlık noktalardan bir örüntü oluşur; ama daha fazla yarık kullanırsan parlak noktalar daha parlaklaşıp daralır, karanlık noktalar da kararıp genişler."

"Yani, çitleri aşıp komşunun bahçesine geçersem öbür tarafta daha parlak ve daralmış mı olurum?"

"Tamam, daha daralırsın, ama bu pek parlak bir fikir olmaz. Burada asıl mesele Davisson ile Germer'in kullandığı 'yarıklar'ın birbirine çok yakın olması; yarıklar birbirine o kadar yakındı ki detektörlerini nereye koysalar sadece tek bir parlak nokta görüyorlardı. Farklı bir kristal ya da daha hızlı hareket eden elektronlar söz konusu olsaydı daha fazla nokta görebilirlerdi."

Aynı tarihlerde Aberdeen Üniversitesi'nde George Paget Thomson da gerçekleştirdiği bir dizi deneyde elektron huzmelerini ince metal tabakaların üzerine gönderiyor; bu elektronların oluşturduğu kırılma örüntülerini gözlemliyordu. (Bu gibi örüntüler esasen, Davisson-Germer deneyindeki örüntüyle aynı şekilde oluşur.) Davisson, Germer ve Thomson'ın gözlemlediği kırılma örüntüleri, Thomas Young'ın 1799'da gösterdiği gibi, dalga davranışının yanılgıya yer bırakmayan bir imzasıydı; dolayısıyla bu deneyler de Broglie'un haklı olduğunu, elektronların dalga niteliğine sahip olduğunu kanıtlıyordu. De Broglie öngörüsünden dolayı 1929'da Nobel Fizik Ödülü'nü aldı; Davisson ile Germer de elektronun dalga niteliğini gösterdikleri için 1937 Nobel Ödülü'nü paylaştılar.[9]

Davisson, Germer ve Thomson'ın deneylerinin ardından bilim insanları, bütün atomaltı parçacıkların dalga gibi davrandıklarını gösterdi: Proton ve nötron huzmeleri tıpkı elektronların yaptığı gibi atom numunelerine çarpıp kırılacaktı. Aslına bakarsanız nötron kırılması artık atomik düzeyde maddelerin yapılarının belirlenmesinde kullanılan standart araçtır: Bilim insanları atomların nasıl düzenlendiğini, atom numunelerine çarpıp kırılan nöt-

---

9- Büyük Nobel dedikodularından biri de Thomson'ın Cambridge'te görevli babası J. J. Thomson'ın elektronun parçacık niteliğini gösterdiği için 1906 Nobel Ödülü'nü kazanmış olmasıdır. Herhalde bu durum Thomsonlar'ın sofrasında ilginç sohbetlere konu olmuştur.

ron huzmeleri sonucu ortaya çıkan girişim örüntülerine bakarak çıkarabilir. Maddelerin atomik düzeydeki yapısının bilinmesi, madde bilimcilerin otomobiller, uçaklar ve uzay araştırmalarında kullanmak üzere daha güçlü ve hafif malzemeler tasarlamasını mümkün kılmıştır. Nötron kırılması proteinler ve enzimler gibi biyolojik maddelerin yapısının belirlenmesinde de kullanılabilir; bu yöntem bilim insanlarına yeni ilaçlar ve tıbbi tedavi arayışında kritik bilgiler sunar.

Her Şey Dalgalardan Yapılmıştır: Moleküllerin Girişimi

Peki, bütün maddi nesneler dalga özelliklerine sahip parçacıklardan oluşuyorsa neden köpeklerin ağaçlara çarpıp kırıldığını görmüyoruz? Bir elektron huzmesi iki sıra atoma çarpıp kırılıyorsa neden bir köpek bir ağacın her iki tarafına doğru koşturup uzaktaki tavşanı yakalayamasın? Cevap dalga boyunda yatar: Daha önce gördüğümüz ses ve ışık dalgalarında olduğu gibi, köpekler ve elektronların engellerle karşılaştıklarında farklı davranışlar göstermeleri dalga boylarındaki farklılıkla açıklanır. Dalga boyu momentumla belirlenir; bir köpeğin bir elektrondan daha fazla momentumu vardır.

Maddi bir nesnenin dalga boyu, Planck sabitinin momentuma bölünmesiyle bulunur; momentum da kütlenin yönlü hızla çarpımına eşittir. Planck sabiti küçük bir rakamdır, ama elektronun kütlesi de öyledir: yaklaşık 10^{-30} kg'dir, yani 0, 000000000000000000000000000001 kg. Davisson ile Germer'in şimşek gibi bir hızla hareket eden, saniyede altı milyon metre yol alan elektronunun dalga boyu bir nanometrenin yaklaşık onda biri kadardı (0,0000000001). Bu aşırı derecede küçüktür; ama iki nikel atomu arasındaki mesafenin yaklaşık yarısına eşittir; kırıl-

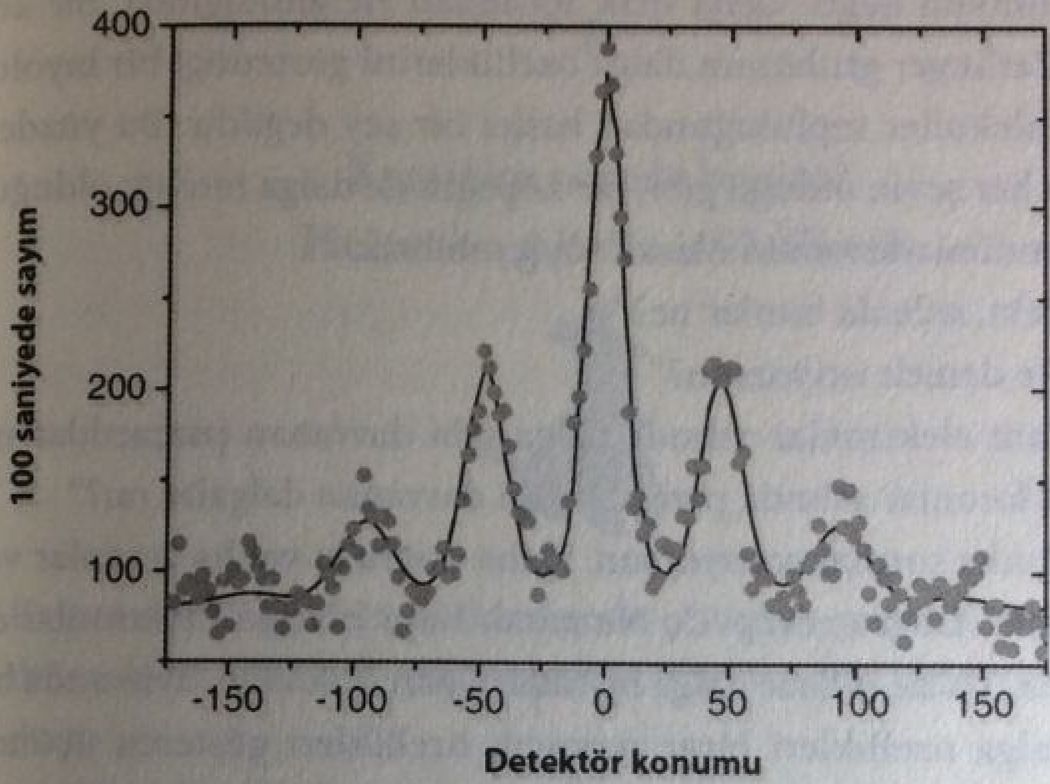
mayı görmek için doğru orandadır (tıpkı dalga boyu yarım metre olan ses dalgalarının bir metre genişliğindeki kapılara hemen çarpıp kırılması gibi).

Gelgelelim gezintiye çıkmış, yaklaşık 20 kg'lik bir köpeğin dalga boyu yaklaşık 10^{-35} metredir (0, 0000000000000000000000000000000001 metre), yani Davisson ile Germer'in elektronunun dalga boyunun bir milyarda birinin milyarda birinin milyonda biri kadar. Peki ya bu bir ağacın büyüklüğünün yanında nasıl kalıyor? Eh, bir köpeğin dalga boyunu iki atom arasındaki mesafeyle karşılaştırmak, iki atom arasındaki mesafeyi güneş sisteminin büyüklüğüyle karşılaştırmaya benziyor. Bırakın bir köpeğin aynı anda ağacın her iki tarafına da koşmasıyla ilgili dalgayı, bir nikel kristaline çarpıp kırılmasıyla bağlantılı dalgayı görmenin bile imkânı yoktur.

Elektron huzmesiyle köpek arasında çok büyük bir fark var; peki gözlenebilir dalga niteliği olduğu görülen en büyük nesne nedir?

Viyana Üniversitesi'nde Dr. Anton Zeilinger başkanlığındaki bir araştırma grubu, küçük futbol topları şeklinde birbirine bağlanmış 60 karbon atomundan oluşan, her biri bir elektronun yaklaşık bir milyon katı kütleye sahip moleküllerin kırılma ve girişim örüntülerini gözlemledi. Futbol topu şeklindeki bu moleküller bir detektöre fırlatıldı; sonra aşağı doğru inen moleküllerin dağılımı incelendiğinde tek bir dar huzme görüldü. Bu huzme, üzerinde çok küçük yarıklar bulunan çok ince bir silikon tabakanın üzerine gönderildi ve yarıkların öbür tarafından çıkan moleküllerin dağılımı izlendi. Yarıklar olduğunda, en başta gözlenen dar tepe daha büyüdü; artık her iki tarafında da ayrı "kümeler" vardı. Thomas Young'ın iki yarıktan ışık yansıttığında gördüğü parlak ve karanlık noktalar ya da Davisson ile Germer'in gördüğü elektron kırılma tepeleri gibi bu kümeler de dalga davranışına ilişkin yanılgıya yer bırakmayan işaretlerdi. Yarıklardan geçen

moleküller tıpkı ışık dalgaları gibi yayılıp birbirine karışıyordu.



Bir dizi dar yarıktan geçen bir molekül huzmesinin yarattığı girişim örüntüsü. Ortadaki zirve noktanın her iki tarafındaki fazladan kümeler yarıklardan geçen moleküllerin çarpıp kırılmasının ve girişmesinin sonucudur. (O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger'in izniyle yeniden basılmıştır. American Journal of Physics, 71, 319 [2003]. Copyright 2003, American Association of Physics Teachers)

Zeilinger grubu sonraki deneylerinde, daha da büyük moleküllerin çarpıp kırılma örüntüsünü inceledi; baştaki 60 karbon atomlu moleküllere 48 florin atomu daha eklendi. Bu moleküllerin kütlesi bir elektronun kütlesinin yaklaşık üç milyon katıdır ve dalga niteliği doğrudan gözlenen en kütleli nesneler şimdilik bunlardır.

Bir parçacığın kütlesi arttıkça dalga boyu kısalır; dalga etkile-

rini doğrudan görmek de daha zorlaşır. Şimdiye kadar hiç kimsenin bir köpeğin bir ağacın etrafında kırıldığını görmemiş olmasının sebebi budur; böyle bir şeyi yakın bir zamanda görmemiz de mümkün değil. Gerçi fizik açısından ele alındığında, bir köpek, Zeilinger grubunun dalga özelliklerini gösterdiği bir biyolojik moleküller topluluğundan başka bir şey değildir. Bu yüzden başka her şeyin olduğu gibi, bir köpeğin de dalga niteliği olduğunu kendimizden emin olarak söyleyebiliriz.

"Peki, *aslında* bunlar ne?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Yani elektronlar aslında dalga gibi davranan parçacıklar mı yoksa fotonlar aslında parçacık gibi davranan dalgalar mı?"

"Yanlış sorular soruyorsun. Daha doğrusu yanlış cevaplar veriyorsun. Doğru cevap 'Üç Numaralı Kapı' olacak. Elektronlar da fotonlar da ne sadece dalga ne sadece parçacık olan, aynı anda biraz dalga özellikleri biraz parçacık özellikleri gösteren üçüncü tür bir nesnenin örnekleridir."

"Yani sinşan gibi?"

"Ne gibi, ne gibi?"

"Biraz sincap, biraz tavşan olan bir yaratık gibi. Sinşan."

"Ben 'kuantum parçacığı' demeyi tercih ediyorum; ama sanırım asıl fikir bu. Evrendeki her şey bu kuantum parçacıklarından oluşur."

"Bu çok tuhaf."

"Ah, bu tuhaflıkların sadece başlangıcı canım..."

II

Kemiğim nerede benim?
Heisenberg Belirsizlik İlkesi



Emmy odaya geldiğinde kanepede oturmuş gazetelere göz gezdiriyordum, endişeli görünüyordu. "Ne var, ne oldu?" diye sordum.

"Kemiğimi bulamıyorum," dedi. "Nerede biliyor musun?"

"Nerede olduğuna dair bir fikrim yok," dedim. "Ama hangi hızla yol aldığını kesinlikle söyleyebilirim."

Bu cevap üzerine bir sessizlik oldu, kafamı kaldırıp baktığımda mel mel bana baktığını gördüm.

"Bu bir fizik esprisi," diye açıkladım; böyle bir açıklama işlere her zaman bir komiklik katar. "Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, bilirsin? Bir nesnenin konumundaki belirsizliğin, momentumundaki belirsizlikle çarpımı Planck sabitinin dört pi'ye bölümünden büyüktür ya? Bu da bir belirsizlik küçük olduğunda, diğerinin çok büyük olması gerektiği anlamına gelir hani?"

Şimdi artık dosdoğru yüzüme bakıyor, neredeyse hırlıyordu. "Kes şunu!"

"Neden? Tamam, o kadar komik değil, ama o kadar berbat da değil."

"Kemiğimi bulamamam senin hatan."

"Neden benim hatam oluyormuş?"

"Gidip ne kadar hızlı hareket ettiğini ölçtün ve konumu belirsizleşti. Şimdi de nerede bulamıyorum."

"Hayır, öyle olmadı," dedim." Belirsizlik ilkesi öyle işlemez."

"Evet, böyle işler. Şimdi söyledin işte. Kemiğimin ne kadar hızlı gittiğini biliyorsun ve ben de şimdi onu bulamıyorum."

"Öncelikle o bir şakaydı. Kemiğinin yönlü hızını gerçekten ölçmedim. İkincisi, bu belirsizlik ilkesine biraz hatalı bir bakış. Mesele, ölçümün sistemin durumunu değiştirmesi değil; mesele ölçebilmemizin, biz konum ve momentumu ölçene kadar onların belirsiz olmasıyla sınırlı olması."

Kafası karışmış görünüyordu. "Ben arada bir fark görmüyorum."

"Bak şimdi: Her şeyi ölçümün etkisine bağladığın tabloda, her neyi ölçüyorsan onun bazı kesin ve iyi tanımlanmış özellikleri olduğunu, bu değerlerde belirsizliğin ancak onların ölçümüyle oluşan sapmalardan kaynaklandığını örtülü olarak varsaymış olursun. Ama olan bu değildir; kuantum kuramında bu niceliklerin kesin değerleri yoktur. Kesin olmamalarının sebebi, senin ölçümündeki sınırlamalar değildir; tanımlanmadıkları için kesin değillerdir ve gerçekliğin kuantum niteliğinden dolayı da tanımlanamazlar."

"Haa!" Bir an düşünceli göründü, sonra yüzüme bakmaya devam etti. "Sanırım kemiğimi kaybettin, kafamı karıştırıp sıyrılmaya çalışıyorsun."

"Hayır, kuram aslında böyle işlemiyor. Gerçi bu pek dile getirilmeyen bir nokta; yönlü hızını ölçerek kemiğinin konumunu bozmuş olsam bile, onu bulmanı engellemek mümkün olamazdı."

"Öyle mi? Nedenmiş o?"

"Çünkü söz konusu belirsizlik çok küçük olurdu. Demek is-

tediğim kemiğinin birkaç yüz gramlık bir kütlesi vardır, yönlü hızını saniyede bir milimetre olarak ölçmüş olsaydım, bu konumunda yaklaşık 10–31 metrelik bir belirsizlik yaratırdı. Bir protonun boyutunun bir trilyonda biri kadar yani; bunu asla fark edemezdin."

"Öyle mi? Peki, benim kemiğim nerede akıllı çocuk?"

"Bilmiyorum. TV dolabının altına baktın mı? Bazen oraya tepilmiş oluyor da."

TV'ye doğru seyirtip burnunu dolabın altına soktu. "Ahh! İşte kemiğim!" Bir süre kemiğe pençe attı, nihayetinde dolabın altından çıkarmayı başardı. "Bir kemiğim var!" Gururla bağırıp gürültüyle çiğnemeye başladı; belirsizlik ilkesini de unutup gitti.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi, Einstein'ın E = mc2'sinden (görelilikten ileri gelen en meşhur sonuçtan) sonra muhtemelen modern fiziğin en bilinen sonucudur. Çoğu insan rastlasa bir dalga fonksiyonunu tanımaz; ama hemen herkes belirsizlik ilkesini duymuştur: Bir nesnenin konumunu ve momentumunu aynı anda bilmek imkânsızdır. Konumu daha iyi ölçerseniz momentum hakkında mutlaka bilgi kaybına uğrarsınız; aynı şey tersi için de geçerlidir.

Bu bölümde, belirsizlik ilkesinin tartışmış olduğumuz parçacık-dalga ikileminden nasıl doğduğunu tanımlayacağız. Belirsizlik ilkesi genellikle, bir sistemin ölçülmesinin sistemi değiştirmesi olarak sunulur; bu biçimiyle kuantum belirsizliğine yapılan göndermeler, siyasetten tutun pop kültüre, hatta spora varıncaya kadar her yerde karşımıza çıkar.[1] Gelgelelim belirsizlik ilke-

---

1- Bu meseleyle ilgili olarak karşımıza çıkan konuların genişliğine dair bir fikir vermek için şunu anlatayım: Haziran 2008'de Google, başka yerlerin yanı sıra *Vermont Free Press*'te yayınlanan trafik kameralarıyla ilgili bir haberde; *Toronto Star*'da yayınlanan, YouTube'un underground sanatçılar üzerindeki etkileriyle ilgili bir makalede; NBA'de oynayan Phoenix Suns takımı hakkındaki bir blog makalesinde Heisenberg belirsizlik ilkesinden bahsedildiğini ortaya koydu; bu bölümün sonuna geldiğimizde, belirsizlik ilkesini buralar-

sinin, ölçümün ayrıntılarıyla pek ilgisi yoktur. Kuantum belirsizliği bilebileceklerinizle ilgili temel bir sınırdır; kuantum nesnelerinin hem dalga hem parçacık özellikleri göstermeleri gerçeğinden doğar.

Belirsizlik ayrıca kuantum fiziğinin felsefeyle çarpıştığı ilk yerdir. Ölçümün temel sınırları olması fikri, klasik fiziğin hedefleri ve temelleriyle doğrudan çatışır. Kuantum belirsizliğiyle uğraşmak, fiziğin temellerinin tamamen yeniden düşünülmesini gerektirir; doğrudan ölçüm ve ölçüm sonuçlarının yorumlanmasıyla ilgili üçüncü ve dördüncü bölümlerde sunacağımız meselelere çıkar.

Heisenberg'in Mikroskopu: Yarı Klasik Argümanlar

Belirsizlik ilkesinin, gelenek halini almış bir biçimde, ölçüm eyleminin sistemin halini değiştirmesi olarak tanımlanması, esasen klasik fiziğe dayanır ve klasik eğitim almış fizikçileri, kuantum belirsizliğinin ciddiye alınması gerektiğine ikna etmek için 1920'lerde, 30'larda geliştirilmiştir. Bu, fizikçilerin yarı klasik argüman dediği şeydir: Kullanılan fizik klasiktir, üzerine birkaç modern fikir eklenmiştir. Tablonun tamamı değildir; ama kolayca anlaşılabilir olmak gibi bir avantajı vardır.

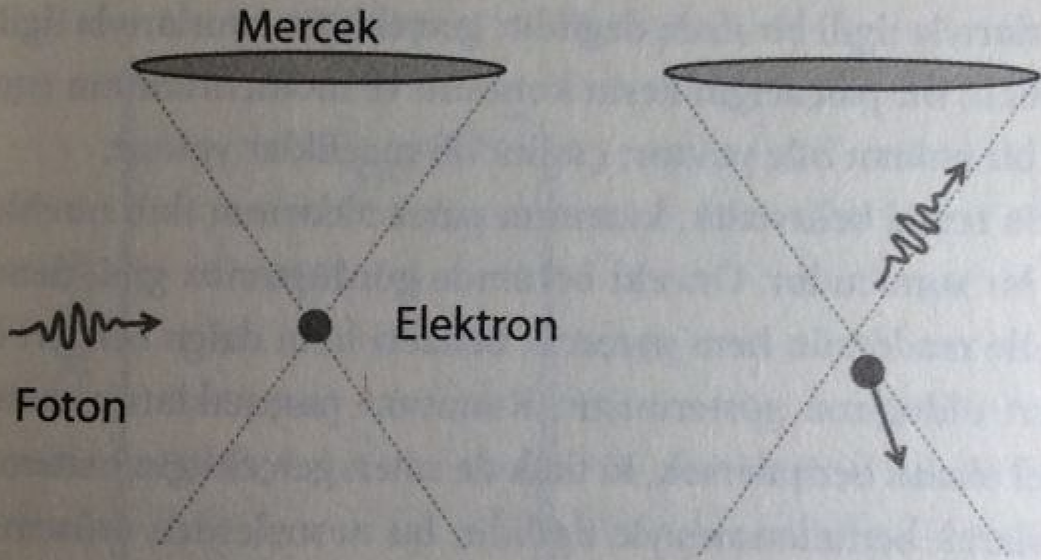
Belirsizliğin yarı klasik ele alınmasının ardındaki fikir, köpeklerin aşina olduğu bir fikirdir. Düşünün: Bahçede, konumunu ve yönlü hızını çok iyi bilmek istediğiniz bir tavşan var. Konumunu daha iyi belirlemeye kalktığınızda (yanına yaklaştığınızda), kaçınılmaz olarak kaçmasına sebep olup yönlü hızını değiştiriyorsunuz. Yanına ne kadar yavaş, sürünürcesine yaklaşırsanız yaklaşın er geç uzaklaşıyor; siz de tavşanın konumunu ve yönlü hızını

---

da bahsedildiğinden çok daha iyi anlamış olacağınızı umuyorum.

gerçekten doğru dürüst öğrenemiyorsunuz.

Elektronlar tavşanlar gibi duyarlı varlıklar değillerdir; bu yüzden kendi başlarına koşmazlar, ama benzer bir süreç yaşanır. Bir elektronun konumunu ölçebilmek için onu görünür kılacak bir şey yapmanız gerekir; elektrona bir ışık fotonu çarptırıp ayrılan ışığı mikroskopla gözlemek gibi. Gelgelelim birinci bölümde gördüğümüz üzere fotonun momentumu vardır; elektrona çarptığında da onun momentumunu değiştirir. Çarpışma sonrası elektronun momentumu kesin değildir; çünkü mikroskop merceği bazı açılardan sıçrayan fotonları toplar; bu yüzden elektronun tam olarak nereye gittiğini söyleyemezsiniz.



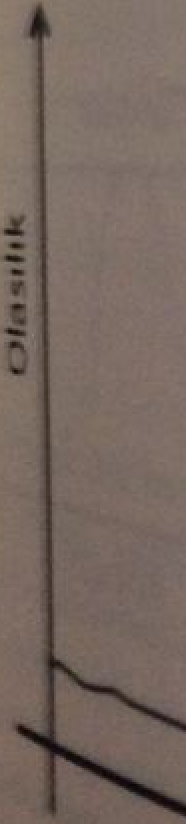
Gelen bir foton, duran bir elektrona çarpar ve elektronun konumunu ölçmek için bir mikroskop merceği tarafından toplanır. Fakat çarpışma sırasında elektron bir momentum kazanır, bu da momentumunda belirsizliğe yol açar.

Işığın dalga boyunu artırarak (fotonun elektrona verebileceği momentumu azaltarak) elektronun momentumunda daha küçük bir değişiklik yaratabilirsiniz; fakat dalga boyunu artırırsanız mikroskopunuzun çözünürlüğünü azaltmış olursunuz ve ko-

num hakkında bilgi kaybına uğrarsınız.[2] Konumu iyi bilmek isterseniz dalga boyu kısa, momentumu çok fazla olan ışık kullanmanız gerekir; böyle bir ışık huzmesi elektronun momentumunda büyük bir değişiklik yaratacaktır. Momentum hakkında bilgi kaybına uğramaksızın elektronun konumunu kesin olarak tespit edemezsiniz; aynı şey tersi için de geçerlidir.

Ne var ki belirsizlik ilkesinin asıl anlamı bundan da derindir. Yukarıdaki mikroskoplu düşünce deneyinin gösterdiği üzere, siz ölçmeye çalışmadan önce elektronun belli bir konumu ve belli bir yönlü hızı vardır; ölçümden sonra da belli bir konumu ve belli bir yönlü hızı olacaktır. Konumun ve yönlü hızın ne olduğunu bilemezsiniz; ama kesin değerleri vardır. Fakat kuantum kuramında bu değerler tanımlı, belirli değildir. Belirsizlik ölçümün sınırlarıyla ilgili bir ifade değildir; gerçekliğin sınırlarıyla ilgili bir ifadedir. Bir parçacığın kesin konumu ve momentumunu istemenin bir anlamı bile yoktur; çünkü bu nicelikler yoktur.

Bu temel belirsizlik, kuantum parçacıklarının ikili niteliklerinin bir sonucudur. Önceki bölümde gördüğümüz gibi, deneyler ışık ile maddenin hem parçacık benzeri hem dalga benzeri özellikleri olduğunu göstermiştir. Kuantum parçacıklarını matematiksel olarak betimlersek, ki fizik de zaten gerçekliğin matematiksel olarak betimlenmesiyle ilgilidir, bu nesnelerden onların aynı anda hem parçacık hem dalga özelliklerine sahip olmasını mümkün kılan bir tarzda bahsetmenin bir yolunu bulmamız gerekiyor. Tek yolun, kuantum parçacıklarının hem konumlarının hem momentumlarının belirsiz olmasından geçtiğini göreceğiz.

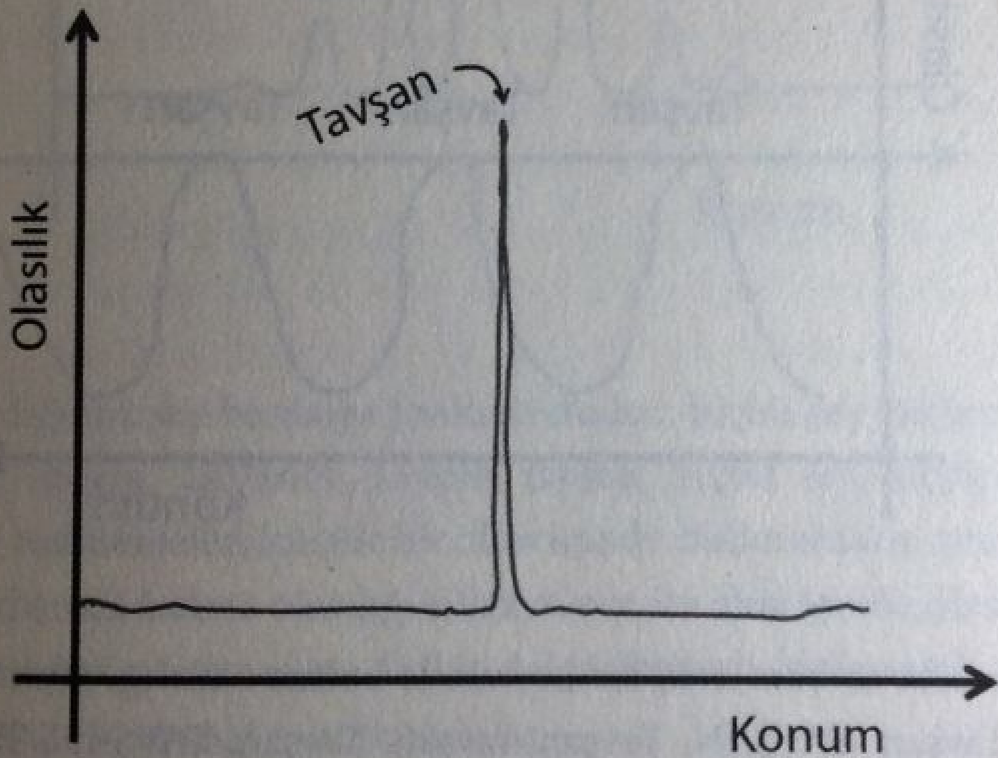


2- Bilim insanlarının çok küçük şeylere bakmak için elektron mikroskopu kullanmasının sebebi budur: Elektron mikroskopları görünür ışık yerine elektron kullanır; elektronların dalga boyları görünür ışıktan daha kı

Bir Kuantum Parçacığı Yapmak: Olasılık Dalgaları

Parçacıkları matematiksel olarak betimlemenin, 1920'lerin sonlarından kalan olağan yolu, kuantum dalga fonksiyonlarından geçer. Bir nesnenin dalga fonksiyonu, evrenin her noktasında bir değeri olan matematiksel bir fonksiyondur; bu değerin karesi, bir parçacığı belli bir zamanda belli bir konumda bulma olasılığını verir. Sormamız gereken soru şudur: Hem dalga hem parçacık özelliklerine sahip bir olasılık dağılımını ne tür bir dalga fonksiyonu verir?

Klasik bir parçacık için bir olasılık dağılımı kurmak kolaydır, sonuç şöyle bir şeye benzer:

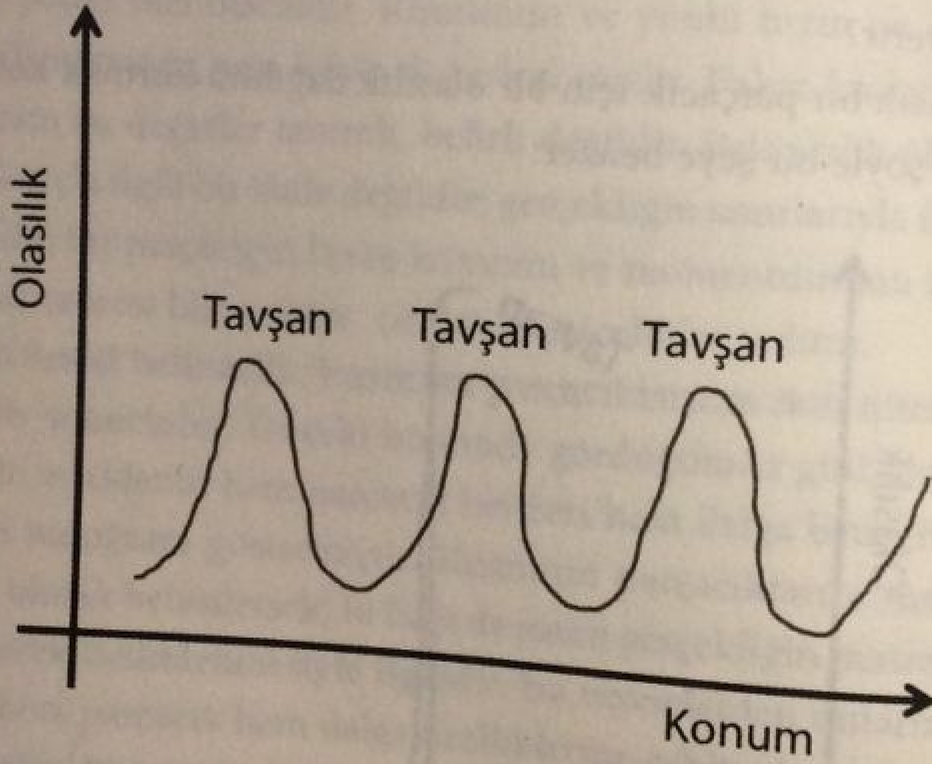


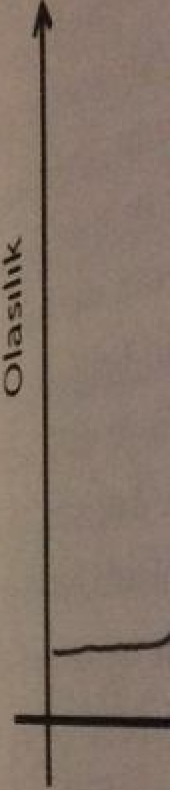
Nesneyi, diyelim ki arka bahçedeki şu sinir bozucu tavşanı bulma olasılığı, nesnenin gayet iyi tanımlanmış konumu dışında her yerde sıfırdır. Bahçeye baktığınızda hiçbir şey görmezsiniz, görmezsiniz, görmezsiniz, TAVŞAN! görürsünüz, görmezsi-

niz, görmezsiniz, görmezsiniz.

Ama bu dalga fonksiyonu bizim gereksinimlerimizi karşılamaz: İyi tanımlanmış bir konumu vardır; ama bu tek bir sivrilmedir ve bir sivrilmenin de dalga boyu yoktur. Unutmayın, dalga boyu tavşanın momentumuna denk düşer; momentum da betimlemeye çalıştığımız niceliklerden biridir, bu yüzden de bir değeri olması gerekir.

Peki, o halde belirgin bir dalga boyu olan bir olasılık dağılımını nasıl çizeriz? Bunu yapmak da kolaydır ve şöyle görünür:



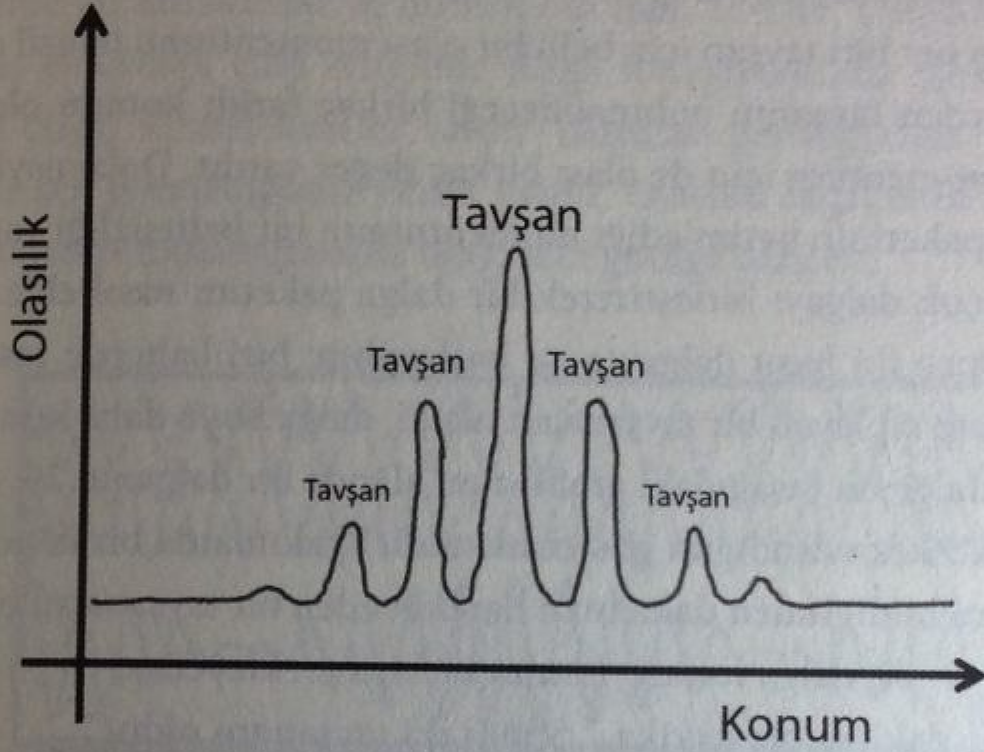


Burada, tavşanı belli bir konumda bulma olasılığı salınır: tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan vs.

Ama bu dalga boyu da gereksinimlerimizi karşılamaz. Bu dalga boyunu tanımlamak kolaydır: Olasılığın en büyük olduğu iki nokta arasındaki mesafeyi ölçeriz, böylece elimizde iyi tanımlanmış bir momentum olur; ama tavşan için belli bir konum belirleyemeyiz. Tavşan bahçenin tamamına yayılmıştır; onu bir sürü

yerde bulma olasılığı vardır. Tavşan görme olasılığının düşük olduğu yerler vardır; ama bunlar fazla yer tutmaz.

İhtiyacımız olan şey bir "dalga paketidir"; parçacık ve dalga özelliklerini tek bir olasılık dağılımında birleştiren bir dalga fonksiyonudur; şöyle:



Aradığımız şey bu dalga fonksiyonudur: hiçbir şey, hiçbir şey, tavşan, Tavşan, TAVŞAN, Tavşan, tavşan, hiçbir şey, hiçbir şey. Tavşan muhtemelen küçük bir alan içinde bulunacaktır, onu bu alanın dışında bulma olasılığı sıfıra düşer. Bu alan içinde olasılıkta salınmalar görürüz; bu da bir dalga boyunu, dolayısıyla momentumu ölçmemizi mümkün kılar.

Bu dalga paketi aradığımız parçacık ve dalga özelliklerine sahiptir. Sonuçta parçacığın hem konumunda hem momentumunda bir belirsizlik de vardır.

Konumdaki belirsizlik dalga paketine bakılır bakılmaz hemen belirgindir. Tavşan belli bir konuma sabitlenemez; onu bulma olasılığının gayet yüksek olduğu birkaç yer vardır. Tavşan büyük

ihtimalle dalga paketinin tam merkezinde bulunacaktır; ama onu biraz solda ya da biraz sağda bulma olasılığı da yüksektir. Bu dalga paketiyle betimlenen konum mutlaka belirsizdir.

Dalga boyundaki belirsizlik o kadar belirgin değildir; ama dalga boyu kesin değildir, çünkü bu dalga paketi aslında her biri farklı momentuma sahip çok sayıda dalganın bileşimidir. Bu dalgaların her biri tavşan için belli bir olası momentumu temsil eder; bu yüzden tavşanın bulunabileceği birkaç farklı konum olduğu gibi, momentum için de olası birkaç değer vardır. Dolayısıyla bu dalga paketinin betimlediği momentumun bir belirsizliği vardır.

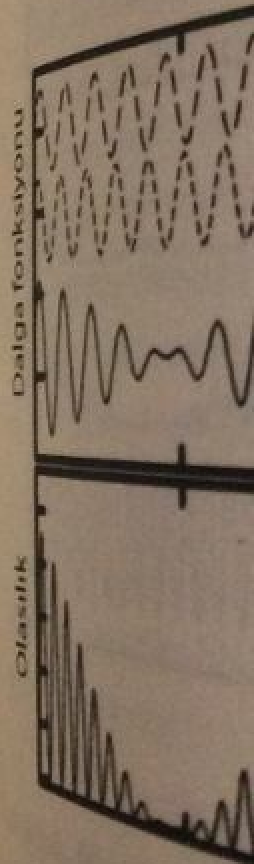
Birçok dalgayı birleştirerek bir dalga paketini nasıl elde ederiz? Önce iki basit dalgayla işe başlayalım; biri bahçede rastgele hoplayıp zıplayan bir tavşana ait olsun; dalga boyu daha kısa olan diğer dalgaysa (aşağıdaki grafik aynı alanda bir dalganın 20, diğerinin 18 kez salındığını göstermektedir) yakınlarda bir köpek olduğunu bildiğinden daha hızlı hareket eden bir tavşana ait olsun. Şimdi bu iki dalga fonksiyonunu birbirine ekleyelim.

"Bir dakika, bir dakika... Şimdi iki tavşan mı oldu?"

"Hayır, her dalga fonksiyonu belli bir momentumu olan bir tavşanı betimliyor; ama her iki seferde de aynı tavşanı."

"Ama bunları birbirine eklemek iki tavşan olduğu anlamına gelmiyor mu?"

"Hayır, hayır; bu durumda, tek bir tavşanı bulabileceğin iki farklı hal[3] olduğu anlamına geliyor sadece. Bahçeye baktığında tavşanı yavaş hareket ederken bulma olasılığın olduğu gibi, biraz hızlı hareket ederken bulma olasılığın da vardır. Matematiksel olarak bunu açıklamanın yolu, iki dalgayı birbirine eklemektir."

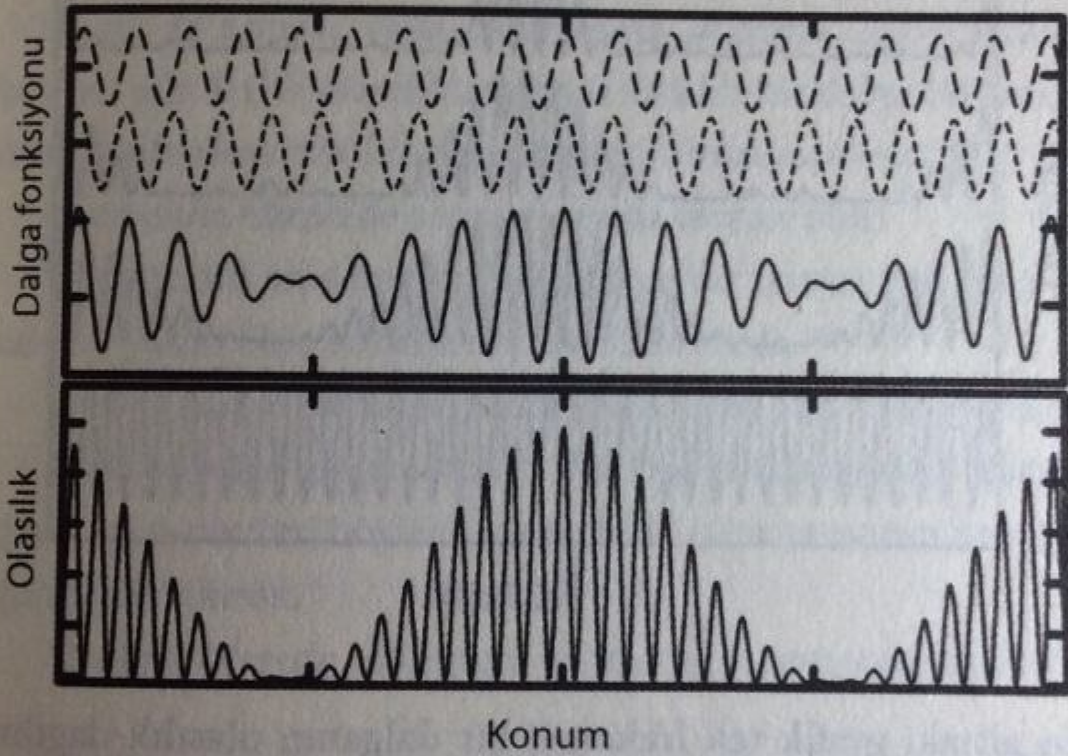


3- Fizikte "hal" bir özellikler toplamını; konum, momentum, enerji vs. toplamını ifade eder. Bahçede belli bir momentumu olan bir tavşanın bir momentum halinde olduğu söylenir. Aynı bahçede aynı momentuma sahip bir tavşan da aynı haldedir; aynı bahçede farklı bir momentumu olan bir tavşan başka bir haldedir. Momentumu birinci tavşanınkiyle aynı olan, ama başka bir bahçede bulunan üçüncü bir tavşan üçüncü bir haldedir vs.

"Ah. Kahretsin. Daha çok tavşan olmasını ummuştum."



Bu iki dalgayı birbirine eklediğimizde, aynı fazda olup daha büyük bir dalga oluşturdukları yerler olduğunu görürüz. Başka yerlerde zıt fazdadırlar ve birbirlerini iptal ederler. Dalgaları birbirine ekleyerek elde ettiğimiz dalga fonksiyonunda (şekildeki kalın çizgi) kümelenmeler vardır; dalgaları gördüğümüz yerler, hiçbir şey görmediğimiz yerler vardır. Olasılık dağılımını almak için bunları topladığımızda aşağıdaki grafiğe ulaşırız:

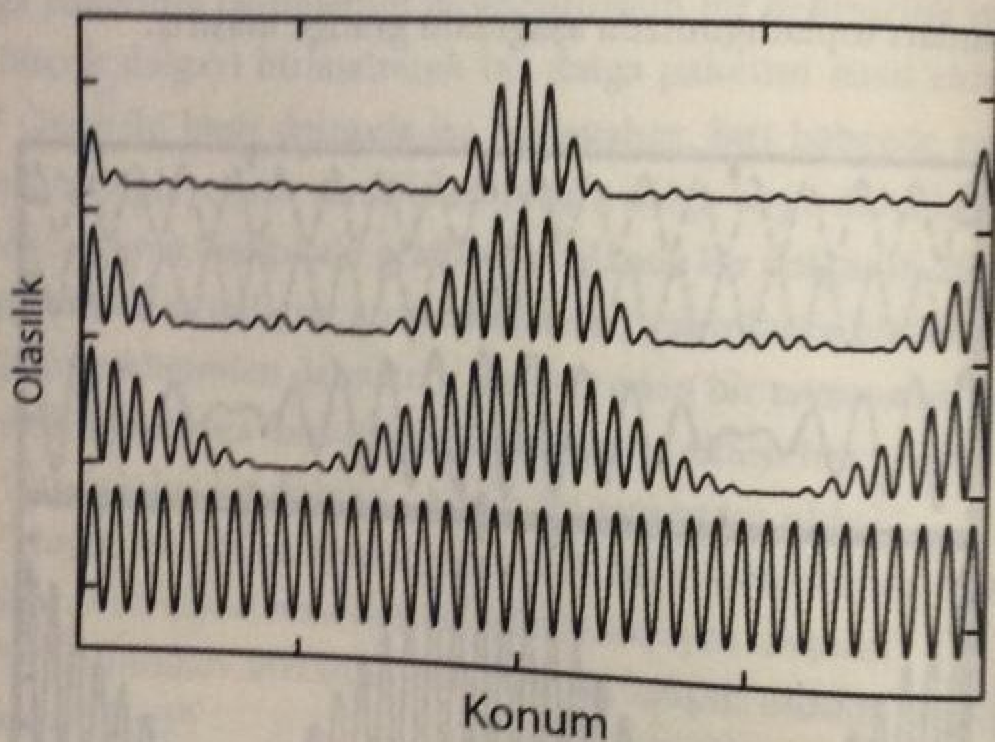


Yukarıdaki grafikteki yarık eğriler, iki farklı dalga boyunun dalga fonksiyonlarını gösterir (açıkça görmeniz için yukarıya çekilmiştir). Kesintisiz çizgi iki dalga fonksiyonunun toplamını gösterir. Aşağıdaki grafik ise bu dalga fonksiyonlarının birbirine eklenmesi sonucu ortaya çıkan olasılık dağılımını verir (yukarıdaki grafikteki kesintisiz çizginin karesi).

Bu olasılık dağılımının orta kısmı, istediğimiz dalga paketi-

ne çok benzer görünüyor. Tavşanı bulma olasılığımızın yüksek olduğu bir alan vardır; bu alanda tavşanın hareketiyle ilişkili bir dalga boyu görürüz. Bu alanın dışında olasılık sıfır olur; bunun anlamı, bir tavşan görme umudumuzun olmadığı yerler olduğudur.

Tabii ki bu iki dalga fonksiyonu tam istediğimiz şey değil; çünkü hiç tavşan bulunmayan bölge çok dar ve onu hemen başka bir kümelenme izliyor. Ama daha fazla dalga ekleyerek durumu iyileştirebiliriz:



En alttaki grafik tek frekanslı bir dalganın olasılık dağılımıdır; üstünde iki, üç ve beş frekanslı dalgaların grafikleri bulunmaktadır.

Üç farklı dalgayı birbirine eklersek tavşanı görme olasılığımızın yüksek olduğu bölge daralır; beş dalgayı eklersek daha da dar olur. Daha fazla sayıda dalgayı ekledikçe yüksek olasılık alanları daha da daralacaktır; bu alanlar arasındaki boşluklar da daha geniş ve düz olacaktır. Sonunda elimize geçen şey, uzun bir dalga paketleri zinciri gibi görünmeye başlayacaktır.

"Bu durumda elimizde uzun bir tavşan zinciri var ha? Ben bir tek tavşandan bahsediyoruz sanmıştım."

"Bir tek tavşandan bahsediyoruz. Elimizde her biri tek bir tavşanı bulabileceğimiz farklı bir yeri betimleyen farklı "dalga paketleri"nden oluşan bir zincir var. Bunu daraltıp tavşanın bulunabileceği tek bir konuma indirmek istersek düzenli aralıkları olan tek tek dalga boylarını değil de sürekli bir dalga boyları dağılımını birbirine ekleriz."

"İyi de bu sonsuz sayıda farklı dalga boyunu birbirine eklemek anlamına gelmeyecek mi?"

"Eh, evet, ama hesap makinesi de bunun için var zaten!"

"Ah, ben hesap makinesinde o kadar da iyi değilimdir."

"Çok az köpek iyidir. Sen benim sözümü dinle; farklı dalga boyları için farklı olasılıklar veren sürekli bir dalga boyları dağılımını toplayarak tek bir dalga paketi oluşturabiliriz."

"Sonunda elimizde sonsuz sayıda tavşan olur!"

"Üzgünüm ama hayır. Yine sadece bir tavşan var; ama birbirine çok yakın olan sonsuz sayıda olası hızda."

"Kahretsin. Ben daha çok tavşan olsun istiyorum hâlâ."

"Eh, sonsuz-toplam dalga fonksiyonu tavşanın konumunu gayet iyi tanımlar; böylece en azından o bir tavşanın nerede olduğunu bilebilirsin."

"Doğru. Nerede olduğunu bilirsem de onu yakalayabilirim!"

Gerçekliğin Sınırları: Belirsizlik İlkesi

Dalga boyları farklı birçok farklı dalgayı bu biçimde birbirine eklemek ne anlama geliyor? Her dalga, bahçede hareket halindeki (tek bir) tavşancık için belli bir momentuma, farklı bir yönlü hıza denk gelir. Bunların hepsini birbirine eklediğimizde, yaptığımız şey bu farklı hallerin her birinde tavşancığı bulma ihtimali-

miz olduğunu söylemektir. (Bundan üçüncü bölümde biraz daha bahsedeceğiz.)

Bu hallerin birbirine eklenmesi, belirsizlik ilkesinin kökeninde yatar. Dar ve iyi tanımlanmış bir dalga paketi elde etmek, böylece tavşanın konumunu gayet iyi bilmek istiyorsak çok fazla sayıda dalgayı birbirine eklememiz gerekir. Her dalga tavşan için olası bir momentuma denk gelir, bu da momentuma büyük bir belirsizlik katar; tavşan çok sayıda farklı hızdan herhangi birinde hareket ediyor olabilir.

Öte yandan momentumu çok iyi bilmek istiyorsak az sayıda farklı dalga boyunu kullanabiliriz; ama bu da bize konumun büyük oranda belirsiz olduğu çok geniş bir dalga paketi verir. Tavşan birkaç olası hızla hareket ediyor olabilir; ama nerede olduğundan artık pek emin olamayız.

Sonsuz genişlikte dalga boyları dağılımını kullanmaksızın iyi tanımlanmış tek bir dalga paketi üretemeyiz; iyi tanımlanmış momentumu olan tek bir dalga paketini de bu paketi her yere yaymadan ortaya çıkaramayız. Yapmayı umabileceğimiz en iyi şey, en başta çizdiğimiz gibi, momentumda da konumda da küçük bir belirsizliğin olduğu bir dalga paketi çıkarmaktır. Matematiksel ayrıntılara girdiğimizde belirsizliklerin olası en küçük çarpımının şu meşhur Heisenberg ilişkisine uyduğunu görürüz:[4]

$$\Delta x \Delta p = h/4\pi$$

Konumdaki belirsizliğin (Δx), momentumdaki belirsizlikle (Δp) çarpımı Planck sabitinin 4π'ye bölünmesine eşittir. Başka

---

4- "Δ" sembolü, herhangi bir kardeşlik köpeğinin size söyleyebileceği gibi Yunan harfi deltadır. Bilimde delta, bir şeydeki değişikliği ya da iki şey arasındaki farkı ifade etmek için kullanılır. Δx konumdaki belirsizliktir, yani nihayetinde ölçtüğünüz konum ile dalga fonksiyonunun verdiği en muhtemel konum arasındaki farklılık miktarıdır. "Büyük meşe ağacından on altı adım uzağa, belki bir adım eksik ya da fazla olabilir, bir kemik gömdüm," derseniz "on altı adım" kemiğin en muhtemel konumudur, "bir adım eksik ya da fazla" ise Δx.

bir dalga paketinin (doğada birçok farklı şekil bulunur) daha büyük bir belirsizlik çarpımı olacaktır; bu yüzden de bu ilişki genellikle büyüktür ya da eşittir işaretiyle yazılır:

$$\Delta x \Delta p > h/4\pi$$

Gelgelelim önemli sonuç aynı kalır: Ne yaparsanız yapın, Δx'i de Δp'yi de sıfır yapmanın bir yolu yoktur; birini küçültmeye çalıştığınızda diğeri mutlaka büyür ve çarpım Heisenberg sınırının üstünde kalır.

O halde dalga fonksiyonları bakımından incelendiğinde, bu ilişkinin, bir sistemi bozmadan ölçme konusundaki yetersizliğimizden kaynaklanan pratik bir sınırın çok ötesine geçtiğini görebiliriz. Bu ilişki, gerçekliğin sınırlarıyla ilgili derin bir ifadedir. Birinci bölümde kuantum parçacıklarının parçacık gibi davrandığını görmüştük; fotonların momentumu vardır ve Compton etkisi çerçevesinde elektronlarla çarpışırlar. Kuantum parçacıklarının dalga gibi davrandığını da gördük; elektronlar, atomlar ve moleküller engellerin etrafında ayrılır, girişim örüntüleri oluşturur. Bu özellikler dizisinin ikisine de aynı anda sahip olmak için ödediğimiz bedel, konum ve momentumun her zaman belirsiz olmasıdır. Belirsizlik ilkesinin anlamı sadece konumu ve momentumu ölçmenin imkânsız olması değil; bu niceliklerin mutlak anlamda var olmamasıdır.

Belirsizliğin Tezahürleri: Sıfır Noktası Enerjisi

Belirsizlik ilkesi bizi, evrenin nasıl işlediğine dair anlayışımızı tamamen yeniden düşünmeye zorlar. Hareket halindeki tek tek parçacıklara bakışımızı değiştirmekle kalmaz, mikroskobik düzeyde maddenin yapısı açısından da derin sonuçları vardır.

Çoğu insan, hatta birçok köpek atomları, eksi yüklü elektron-

ların artı yüklü çekirdek etrafında yörüngede döndüğü mini mini güneş sistemleri olarak görür. Bu tablo 1913'te, Niels Bohr'un hidrojen atomu için ilk kuantum modelini önermesiyle doğmuştur.

Bohr'un modelinde bir hidrojen atomunun bir elektronu çekirdek etrafında, sadece çok belli bazı yörüngelerde, iyi tanımlanmış belli enerji değerleriyle döner. Bu yörüngeler hidrojenin "mümkün olan halleri"dir; mümkün olan haldeki bir elektron memnuniyetle orada kalacaktır. Elektronlar arada kalmış enerjilerdeki yörüngelerde asla bulunamaz. Fizikçiler bu hallerden genellikle, bunlar bir merdivenin basamaklarıymış, elektronlar da uyuyacak yer arayan köpeklermiş gibi bahsederler. Köpek zeminde ya da basamaklardan birinin üzerinde rahatça dinlenebilir; ama iki basamağın arasına yatma girişimi hüsranla sonuçlanacaktır.

Bohr'un modeli hidrojenin saldığı ve yuttuğu karakteristik ışık renklerini betimleme konusunda parlak bir biçimde işler. Elektronlar, ışık fotonlarının yutulması ve salınmasıyla izinli durumlar arasında hareket edebilir; salınan ışığın frekansı iki hal arasındaki enerji farklılıklarına tekabül eder. Bohr modeli böylece fizikçileri yıllarca bunaltmış bir problemi çözmüştür.
Bohr bu modeli önerdiğinde, önceki fizikten cesur bir kopuşu ortaya koymuştu. Maalesef bu model klasik ve kuantum fikirlerinin, sağlam bir kuramsal açıklama olmaksızın birbirine harmanlanmasıydı. Louis de Broglie'un elektrona ilişkin dalga modeli kayıp kuramsal temeli sağlar; fakat parçacık-dalga ikilemi izinli durumlar fikrini açıklasa da gezegenlerin güneşin etrafında dönmeleri gibi elektronların da çekirdeğin etrafında yörüngede döndükleri imgesinden vazgeçmemizi gerektirir.
Bu tablodaki temel sorun, belirsizliğe yol açanla aynı meseledir. Güneş sistemi modelinin doğru olabilmesi için, elektronun mümkün olan yörünge üzerinde iyi tanımlanmış bir konumu ve

onu bu yörüngede hareket ettiren iyi tanımlanmış bir momentumu olması gerekir. Fakat bunun işlemesi mümkün değildir; elektronun konumunu gezegensel bir yörüngede saptayacak kadar iyi tanımlamaya çalıştığımızda momentumunda büyük bir belirsizlik olması gerekir; bu da nereye gittiğini söyleyemeyeceğimiz anlamına gelir. Elektronun momentumunu, onu bir yörünge üzerinde saptayacak kadar iyi tanımlamaya çalıştığımızda da konumunda büyük bir belirsizlik olması gerekir; bu da elektronun, yörüngesinde olduğu varsayılan çekirdeğin yakınında olup olmadığından bile emin olamayacağımız anlamına gelir.

Elektronun dalga niteliğini dikkate aldığımızda, gezegenler olarak elektronlar fikrini bir kenara bırakmak zorunda kalırız. Elektron çekirdek etrafında kabarık bir tür "bulut" içinde döner; konumu belirsizdir, ama çekirdeğin yakınlarındaki bir bölgeyle sınırlıdır; momentumu belirsizdir, ama onu çekirdeğin yakınlarında tutacak değerlerle sınırlıdır. Bohr'un mümkün olan enerji halleri fikri hâlâ geçerlidir; elektron her zaman Bohr'un kuramında öngörülen sınırlı enerji değerlerinden birinde olacaktır; ama bu haller artık elektronların belli yörüngelerde dönmesine tekabül etmez.

"Bir dakika, bir dakika! Elektronun belli bir yeri yok da çekirdeğin yakınlarında gibi öyle mi?"

"Evet öyle. Farklı enerji halleri, elektronları belli konumlarda bulma konusunda farklı olasılıklara denk düşer; yüksek enerji halleri de elektronu çekirdekten uzakta bulma olasılığını, düşük enerji hallerine göre artırır. Fakat mümkün olan hallerin herhangi birinde, elektron çekirdekten sadece birkaç nanometre uzakta olabilir."

"Peki, iki atomu birbirine yaklaştırırsan ne olur?"

"Eh, iki atomu yeterince birbirine yaklaştırırsan, kuantum konumundaki bu belirsizlik yüzünden bir atoma bağlı bir elektron diğer atoma geçebilir. Buna altıncı bölümde, tünellemeden

bahsederken biraz daha değineceğiz."

"Tamam."

"Bir elektronun iki atom arasında 'paylaşıldığı' durumlar da olabilir. Kimyasal bağlar böyle kurulur. Bir avuç atom birlikte katılaşırsa, bir elektron bütün katıda paylaşılabilir. Metallerin nasıl elektrik ilettiğini, yarı iletken bilgisayar yongalarının nasıl yapıldığını anlamamızı sağlayan kuantum katılar kuramının temeli budur. Bütün bunlar, elektronlar belli gezegensel yörüngelerin ötesine geçebildiği için olur."

"Belirsiz elektronlar da pek tuhafmış."

"Doğrusunu söylemek gerekirse sadece elektronlar da değil. Evrendeki her şey belirsizlik ilkesine tabidir ve kesin olmayan bir konumda, kesin olmayan bir yönlü hızdadır."

"Bu doğru olamaz. Demek istediğim kemiğimi görüyorum işte: Tam şurada, kesin bir konumu var ve yönlü hızı da sıfır."

"Ah, ama kemiğinle ilişkili kuantum belirsizliği, onu ölçmekle ilgili pratik belirsizlik yüzünden çok küçülür. Kemiğine gerçekten dikkatli bakarsan, konumunu bir milimetrelik bir hata payıyla saptayabilirsin."

"Ben kemiğime hep dikkatli bakarım."

"... ve kahramanca bir çabayla bu hata payını yüz nanometreye indirebilirsin. Bu durumda yüz gramlık kemiğinin yönlü hız belirsizliği sadece 10-27 m/s olacaktır; yani yönlü hız sıfır artı ya da eksi 10-27 olacaktır."

"Hmm, bu bayağı yavaş."

"Evet, öyle de diyebiliriz. Bu hızda tek bir atomun enini aşmak evrenin yaşı kadar yıl alır."

"Eh, gerçekten de yavaşmış."

"Gündelik nesneler çok büyük oldukları için, onlarla ilişkili kuantum belirsizliğini görmeyiz. Belirsizliği doğrudan, çok küçük yerlerle sınırlanmış çok küçük parçacıklara baktığımızda doğrudan görürüz."

"Atomların yakınındaki elektronlar gibi!"

"Aynen öyle."

Belirsizliğin atomların yapısı üzerinde daha da derin başka bir etkisi vardır. Elektronların hem konumları hem momentumlarında belirsizlik olmalıdır; bu da bir atomdaki bir elektronun enerjisinin asla sıfır olamayacağı anlamına gelir. Bir atomun parçasıyken sıfır enerjide olması için bir elektronun hareket etmiyor, çekirdeğin tepesinde oturuyor olması gerekir. Daha önce de gördüğümüz gibi bu imkânsızdır; buna en yaklaşabileceğimiz nokta, çekirdeği merkez alan, momentumun sıfır olmadığı birçok farklı hali kapsayan dar bir elektron dalga paketi çıkarmak olacaktır. Bu durumda, hidrojenin en düşük enerjili izinli durumunde bile bir enerji vardır.

Bu genel bir fenomendir ve sınırlanmış bütün kuantum parçacıkları için geçerlidir. Bir parçacığın uzayın belli bir bölgesinde olduğunu bilmemiz, konumun belirsizliğini sınırlar; momentumun belirsizliğini artırır. Sınırlanmış kuantum parçacıkları hiç durmazlar; bir sepetin içindeki köpek yavruları gibidirler; hep kıpır kıpırdırlar, yerlerinde duramazlar, uykudayken bile hareket edip dururlar.

Bu küçük hareket kalıntısına sıfır noktası enerjisi denir; sıfır noktası enerjisi, sınırlanmış olmasından ötürü bir parçacıkla ilişkili olan minimum kuantum enerjisidir. Sıfır noktası enerjisi, sınırlanmış bir parçacığın sahip olabileceği enerjiye mutlak bir alt sınır getirir; sistemi ne kadar titiz hazırlarsanız hazırlayın o sistemdeki parçacıklar her zaman hareket halinde olacaklardır; rastgele küçük dalgalanmalar parçacıkların yönlü hızlarının büyüklüğünü ve yönünü sürekli değiştirecektir.

Sıfır noktası enerjisi, kuantum fiziğinde sezgilere en fazla ters düşen fikirlerden biridir; bize hiçbir şeyin hiçbir zaman tam bir durma halinde olmayacağını söyler. Bu, bir sistemde siz sistemin bütün enerjisini almak için ne kadar çabalarsanız çabalayın her

zaman bir enerji olduğu anlamına gelir. Boş uzayın bile sıfır noktası enerjisi vardır; atomlardan kendiliğinden foton salımı ve boşlukta metal plakalar arasındaki "Casimir kuvvetleri" denilen minik kuvvetler de dahil olmak üzere bazı şaşırtıcı sonuçlara yol açar bu. Boş uzayın sıfır noktası enerjisi, dokuzuncu bölümde göreceğimiz üzere kısa ömürlü "sanal" parçacık çiftleri bile yaratabilir.

Sıfır noktası enerjisi muhtemelen belirsizlik ilkesinin en önemli tezahürlerinden biridir. Varlığı, evrenimizi oluşturan bütün parçacıkların kuantum niteliğinin doğrudan sonucudur.

"Yani bütün bunlarda asıl mesele, konum ve momentumun kesin değerleri olmaması, ha?"

"Evet, aynen öyle."

"Peki, bu sadece bunlar için mi geçerli?"

"Hayır, fiziksel nicelik çiftleri arasında birçok farklı belirsizlik ilişkisi vardır. Örneğin açısal momentumun belirsizliği vardır; dönen bir nesnenin hem yönünü hem dönme hızını aynı anda bilemezsin. Bir ışık huzmesindeki foton sayısıyla huzmeyle ilişkili dalganın fazı arasında da bir belirsizlik ilişkisi vardır. Belirsizlik ilişkilerine kuantum fiziğinin her yerinde rastlanır."

"Yani temelde, hiçbir şey mutlak anlamda belirli, tanımlı, kesin değildir, ha? Bu biraz şey... Postmodern değil mi?"

"Yok, o kadar kötü değil; deney yapan farklı kişilerin kendi sonuçlarını ortaya çıkarması gibi bir durum yok. Kuantum etkilerinden kaynaklanan belirsizlik genellikle çok küçüktür; bu yüzden pratik amaçlarla makroskobik nesneleri sanki kesin özellikleri varmış gibi ele alabiliriz. Ama mikroskobik düzeyde bu niceliklerin hiçbiri için tek bir kesin değer yoktur."

"Ama daha önce tavşanların kesin konumunu ölçmekten bahsetmiştin. Kesin konumları yoksa bu nasıl oluyor peki?"

"Çok güzel bir soru, bizi bir sonraki bölüme, yeni bir tuhaflıklar alanına götürüyor."

III

Schrödinger'in Köpeği: Kopenhag Yorumu



Mutfakta bir bardak su içmekle meşgulüm, o sırada Emmy kuyruğunu sallayarak içeri giriyor. "Bana bir ödül vermelisin," diyor.

"Vermeli miyim? Neden sana ödül vermeliymişim?"

"Çünkü çok iyi bir köpeğim ve de ödülü hak ediyorum."

"Sana sebepsiz ödül vermeyeceğim," diyorum, "ama ne yapacağımı söyleyeyim." Ödül kavanozuna uzanıyorum, sonra iki yumruğumu birden uzatıyorum. "Ödülün nerede olduğunu tahmin et, senin olsun."

Derhal burnu çalışmaya başlıyor.

"Koklamak yok." Ellerimi arkama saklıyorum. "Ödül hangi elimde tahmin et."

"Hmm... Olur. İkisinde de."

"Hayır, böyle bir seçenek yok."

"Ama doğru cevap," diyor somurtup. "Kutudaki kedi gibi işte."

"Ne kutusu? Ne kedisi?"

"Hani var ya bir kedi kutunun içinde. Şey var yanında da. Hem ölü hem diri. Kutuda."

"Schrödinger'in kedisi mi?"

"Hah işte! İşte o!" Heyecanla kuyruğunu sallıyor. "O deneyi seviyorum. Yapmalısın."

"Bir kere o kuantum tahminlerinin saçmalığını göstermek üzere tasarlanmış bir düşünce deneyi. Kimse gerçekte yapmamış. İkincisi, kedileri öldürmeye başlarsak insanların bunu beğeneceğinden kuşkuluyum."

"Öldürmek umrumda değil. Kedileri kutulara koyma fikrini sevdim. Kedilerin yeri kutular."

"İyi, bilim camiasına iletirim. Ama bunun senin ödülünle ne ilgisi var?"

"Eh, ödül sağ elinde de olabilir, sol elinde de. Hangisinde olduğunu bilmiyorum, nerede olduğunu bulmak için koklamama izin de vermiyorsun; demek ki ödül hem sağ hem sol elinde bir süperpozisyon durumunda. Hangi elinde olduğunu ölçünceye kadar cevap aynı anda her iki elinde birden olduğu."

"Ilginç bir argüman. Ama burada geçerli değil."

"Evet, geçerli. Temel kuantum fiziği bu."

"Eh evet, ölçülmemiş nesnelerin genel olarak süperpozisyon durumunda olduğu doğru," diyorum. "Ama bu süperpozisyon durumları son derece hassastır. Herhangi bir müdahale, tek bir fotonun yutulması ya da salınması bile bunların kesin bir değeri olan klasik hallere düşmesine yol açar."

"Ama insanlar bunları görmüştür."

"Elbette, yapılmış bir sürü 'kedi durumu' deneyi vardır. Ama şimdiye kadar yapılabilmiş en büyük süperpozisyonda yaklaşık bir milyar elektron vardı.[1] Bu hiçbir şekilde bir köpek ödülünün büyüklüğüne yakın değildir, köpek ödüllerinde yaklaşık 10^{22} atom bulunur."

"Ha?"

"Bir de şu var: Kopenhag yorumunun en uç versiyonunda bile dalga fonksiyonu bilinçli bir gözlemcinin gözlemleme eylemiyle

1- Bakınız dördüncü bölüm.

çöker. Şimdi kimin gözlemci sayılacağını tartışabilirsin."

"Bir kedi olmaz, orası kesin. Kediler ahmak olur."

"Evet, ama makul ölçütler çerçevesinde ben bir gözlemci sayılırım. Ödülün hangi elde olduğunu biliyorum. Bu yüzden klasik bir olasılık dağılımıyla uğraşıyorsun, ödül iki elden birinde; ödülün aynı anda iki elde birden olduğu bir kuantum süperpozisyonuyla uğraşmıyorsun."

"Ah, peki." Hayal kırıklığına uğramış gibi görünüyor.

"Peki, tahmin et şimdi, hangi elimde?"

"Hmm... Ben yine her ikisinde de diyorum."

"Nedenmiş o?"

"Çünkü ben mükemmel bir köpeğim, iki ödülü hak ediyorum!"

"Eh, peki. Ben de avanağın tekiyim." Ona ödüllerin ikisini de veriyorum.

"Ooo! Ödüller!" diyor, mutlu mutlu çiğnerken.

Kuantum mekaniğini incelemenin en can sıkıcı yönlerinden biri, klasik dünyanın inatçı bir klasiklik göstermesidir. Kuantum fiziğinde her tür muhteşem şey görülür; dalga gibi davranan parçacıklar, aynı anda iki yerde birden olan nesneler, hem diri hem ölü olan kediler; ama yine de bunların hiçbirini etrafımızdaki dünyada görmeyiz. Gündelik bir nesneye baktığımızda onu kesin klasik bir halde görürüz; belli bir konumu, yönlü hızı, enerjisi vs. vardır. Kuantum mekaniğinin izin verdiği tuhaf durumlar bileşimlerinin hiçbirinde değildir. Parçacıklar ve dalgalar tamamen farklı görünür; köpekler bir engelin sadece şu ya da bu tarafına geçebilir; kedilerse inatçı, rahatsız edici derecede canlıdırlar; tuhaf köpeklerce koklanmaktan hoşlanmazlar.

Kuantum mekaniğinin daha tuhaf yönlerini ancak büyük bir çalışmayla, titizlikle denetlenen koşullar altında doğrudan gözleriz. Kuantum hallerinin dikkat çekici bir hassaslık gösterdiği,

kolayca bozulabildiği gözlenmiştir; bu hassasiyetin sebebi hemen belirlenebilir değildir. Aslına bakarsanız kuantum kurallarının gündelik köpekler ve kedilerin bulunduğu makroskobik dünya için neden geçerli olmadığını belirlemek şaşırtıcı zorlukta bir problemdir. Mikroskobik olandan makroskobik olana geçişte tam olarak neler olduğu geçen yüzyılın en iyi fizikçilerinin birçoğunu sıkıntıya sokmuştur; buna verilmiş açık bir cevap hâlâ yoktur.

Bu bölümde kuantum fiziğini anlamamız açısından temel önemdeki ilkeleri ortaya koyacağız: dalga fonksiyonları, izinli durumlar, olasılık ve ölçüm. Kilit bir örnek sistem tanıtacağız ve kuantum fiziğinin bütün temel özelliklerini gösteren basit bir deneyden bahsedeceğiz. Kuantum ölçümünün temel rastgeleliğinden ve bu rastgeleliğin doğurduğu, kuantum fiziğinin bazı kurucularının ondan tümüyle vazgeçmelerine neden olacak kadar rahatsız edici buldukları felsefi sorunlardan söz edeceğiz.

Dalga Fonksiyonu Ne Anlama Gelir? Kuantum Mekaniğinin Yorumu

Kuantum mekaniğiyle ilgili felsefi sorunların çoğu kuramın "yorumu" etrafında döner. Klasik fiziğin yoruma ihtiyacı olmadığı için bu kuantum fiziğine özgü bir sorundur. Klasik fizikte bir nesnenin konumunu, yönlü hızını ve ivmesini tahmin edersiniz; bu niceliklerin ne anlama geldiğini, onları nasıl ölçeceğinizi tamamen bilirsiniz. Kuram ile gözlediğimiz gerçeklik arasında hemen kurulan sezgisel bir bağlantı vardır.

Oysa kuantum mekaniği, bu kadar belirgin olmanın yakınından bile geçmez. Kurama hükmeden, dalga fonksiyonlarını hesaplamamızı, onların davranışlarını öngörmemizi sağlayan matematiksel denklemlerimiz vardır; ama bu dalga fonksiyonları-

nın ne anlama geldiği o kadar açık değildir. Hesapladığımız dalga fonksiyonlarını deneylerde ölçtüğümüz özelliklere bağlamak için bir "yoruma", fazladan bir açıklama katmanına ihtiyacımız vardır.

Kuantum mekaniğinin merkezi unsurları birçok farklı biçimde sunulabilir; konu hakkındaki kitapların sayısı kadar farklı biçim vardır; ama sonunda bunların hepsi de dört temel ilkeye dayanır. Bunları kuramın kilit ilkeleri, ilerleyebilmek için kabul etmeniz gereken temel kurallar olarak düşünebilirsiniz.[2]

Kuantum Mekaniğinin Ana İlkeleri

1. **Dalga fonksiyonları**: Evrendeki her nesne bir kuantum dalga fonksiyonuyla betimlenir.
2. **İzinli durumlar**: Bir kuantum nesnesi ancak sınırlı sayıdaki izinli durumlardan birinde gözlenebilir.
3. **Olasılık**: Bir nesnenin dalga fonksiyonu onun izinli durumların her birinde bulunma olasılığını belirler.
4. **Ölçüm**: Bir nesnenin halini ölçmek, mutlaka o nesnenin halini belirler.

İlk ilke dalga fonksiyonu fikridir. Evrendeki her nesne ya da nesneler sistemi bir dalga fonksiyonuyla; uzayın her noktasında bir değeri olan matematiksel bir fonksiyonla betimlenir. Neyi betimlediğiniz önemli değildir; bir elektron, köpek maması, kutudaki bir kedi olabilir; ama bu nesnenin bir dalga fonksiyonu vardır ve bu dalga fonksiyonunun nereye bakarsanız bakın bir değeri vardır. Bu değer artı olabilir, eksi olabilir, sıfır olabilir, hatta hayali bir sayı bile olabilir (-1'in kare kökü gibi); ama her yerde bir değeri vardır.

2- İnsanlarla birlikte yaşayan köpekler için "Mobilyaların üstüne çıkmamalısın" tarzı kurallar gibi.

Schrödinger denklemi denilen (onu keşfeden Avusturyalı fizikçi ve tanınmış hırt[3] Erwin Schrödinger'in adıyla) matematiksel bir formül, dalga fonksiyonlarının davranışlarına hükmeder. İlgilenilen nesneye dair bazı temel bilgiler dikkate alındığında, Schrödinger denklemini bu nesnenin dalga fonksiyonunu hesaplamakta ve bu dalga fonksiyonunun zaman içinde nasıl değişeceğini belirlemekte kullanabilirsiniz; şimdiki konumu ve yönlü hızı verildiğinde bir köpeğin gelecekteki konumunu tahmin etmek için Newton kanunlarını kullanabileceğiniz gibi. Dalga fonksiyonu nesnenin gözlenebilir bütün özelliklerini belirler.

İkinci ilke, izinli durumlar fikridir. Kuantum kuramında bir nesne ancak belli hallerde gözlenebilir. Bu ilke "kuantum mekaniğinin" "kuantum"unu koyan ilkedir; bir ışık huzmesindeki enerji bir foton akışı olarak gelir; her foton bölünemeyecek bir ışık kuantumudur. Bir fotonunuz, iki fotonunuz, üç fotonunuz olabilir; ama asla bir buçuk ya da pi sayısı kadar fotonunuz olamaz.

Aynı şekilde, bir atom çekirdeğinin etrafında yörüngede dönen bir elektron ancak belli çok özel durumlarda bulunabilir.[4] Bu hallerin her birinin belli bir enerjisi vardır; elektron her zaman bu enerjilerden birinde bulunacaktır, asla arada bir durumda bulunmayacaktır. Elektronlar belli bir frekansta ışık yutarak ya da salarak bu haller arasında hareket edebilirler; örneğin bir neon lambasının kırmızı ışığı, neon atomlarının iki durum arasındaki geçişinden kaynaklanır; ama elektronların bu sıçramaları bir

3- Schrödinger fiziğe katkıları kadar çapkınlığıyla da meşhurdu. Adını taşıyan bu denklemi, birçok kız arkadaşından biriyle bir kayak tatilindeyken bulmuştu; kendisinin, hiçbiri de karısı olmayan üç ayrı hanımdan kızları vardı. Karısı ilişkilerini biliyordu. Schrödinger'in sıradışı özel hayatı 1933'te Almanya'dan ayrılması sonrasında Oxford'da bir mevki edinemesine mal oldu; ama yıllar boyunca az çok açık bir şekilde, biri bir meslektaşının hanımı olan iki kadınla birden yaşamayı sürdürdü.

4- İkinci bölümün sonunda tartıştığımız üzere.

anda olur, aradaki enerjilerden geçmezler. İki durum arasındaki ciddi bir değişimi ifade eden "kuantum sıçraması" teriminin kökeni budur; gerçekte enerji sıçraması çok küçüktür, ama durumdaki değişiklik neredeyse hiç zaman almaz.

Üçüncü ilke olasılık fikridir. Bir nesnenin dalga fonksiyonu farklı mümkün hal olasılıklarını belirler. Diyelim ki bir köpeğin konumuyla ilgileniyorsunuz; dalga fonksiyonu size köpeği oturma odasında bulma olasılığınızın çok yüksek olduğunu, yatak odasında bulmanızın daha düşük bir olasılık olduğunu, Jüpiter'in uydularından birinde bulmanızın son derece düşük bir olasılık olduğunu söyleyecektir. Aynı köpeğin enerjisiyle ilgileniyorsanız dalga fonksiyonu size onu uyurken bulma olasılığınızın çok güçlü olduğunu, ortalıkta sıçrayıp havlarken bulma olasılığınızın güçlü olduğunu, uslu uslu matematik problemleri çözerken bulma olasılığınızınsa neredeyse hiç olmadığını söyleyecektir.

Felsefi problemler de bu noktada işin içine girmeye başlar; çünkü dalga fonksiyonunun size vermediği şey kesinliktir. Kuantum kuramı yalnızca olasılıkları hesaplamanızı mümkün kılar; mutlak sonuçları değil. Köpeği oturma odasında bulma olasılığı olduğunu, mutfakta bulma olasılığı olduğunu söyleyebilirsiniz; ama bakıncaya kadar nerede olduğunu söyleyemezsiniz. Aynı ölçümü aynı koşullarda tekrarlayacak, öğleden sonra dörtte "Köpek nerede?" diye soracak olursanız farklı günlerde farklı sonuçlar alırsınız; ama bütün sonuçları bir araya getirdiğinizde dalga fonksiyonunun öngördüğü olasılığa denk düştüklerini görürsünüz. Tek bir ölçümde neler olacağını önceden söyleyemezsiniz; ancak ve ancak tekrarlanan birçok deneyin ardından neler olacağını söyleyebilirsiniz.

Kuantum rastgeleliği klasik fizikle yetişmiş insanlar için muazzam derecede rahatsız edici bir fikirdir; klasik fizikte deneyinizin başlangıç koşullarını yeterince iyi biliyorsanız sonucu mutlak bir kesinlikle tahmin edebilirsiniz: Köpeğin mutfakta olaca-

ğını bilirsiniz; bakmanız da sadece zaten bildiğiniz şeyi doğrular. Gerçi kuantum mekaniği bu şekilde işlemez: Aynı biçimde hazırlanmış deneyler tümüyle farklı sonuçlar verebilir; bütün tahmin edebileceğiniz de olasılıklardır. Bu rastgelelik Einstein'ın "Tanrı Evren'le zar atmaz" diye özetlenebilecek[5] çeşitli yorumlarda bulunmasına neden olan felsefi meseledir.



"Fizikçiler aptal."

"Neden öyle diyorsun?"

"Rastgelelikte rahatsız edici olan ne var ki? Ben hiçbir şeyin sonucunu o şey olmadan önce kesin olarak bilemiyorum, halimden de gayet memnunum."

"Eh, sen bir köpeksin, fizikçi değilsin. Ama iyi bir noktaya parmak bastın. Klasik fiziğin sorumlu bir biçimde pratik olarak ele alındığı her durumda, tahminlere bir olasılık unsuru dahil edilmelidir. Bir deneyin sonucunu etkileyebilecek bütün küçük sapmalar açıklanamaz çünkü."

"Brezilya'daki şu kelebek gibi mi? Havayı bozuyor hani?"

"Aynen öyle. Bildik metafordur: Amazon'da bir kelebek kanatlarını çırpar, bir hafta sonra Schenectady'de bir fırtına kopar. Hava durumunu etkileyebilecek bütün kelebekleri tek tek hesaba katamayacağını, bu yüzden klasik fizikte bile olasılığın kaçınılmaz olduğunu gösteren kaos kuramının klasik örneğidir."

"Aptal kaos kelebekleri."

"Mesele şu: Kuantum olasılığı tümüyle farklı bir oyundur.

5- Einstein'ın kuantum mekaniğinin olasılıklara dayalı niteliği hakkında söyleyeceği birçok olumsuz şey vardı; ama bu bildik sözün kökeni 1926'da Max Born'a yazdığı, "Kuram çok şey veriyor, ama bizi Ihtiyar'ın sırrına pek yaklaştırmıyor. Ben O'nun zar atmadığına kaniyim," dediği mektuptur. (David Lindley'nin *Uncertainty* adlı kitabında aktarılmıştır, s. 137).

Klasik fizikte karşımıza çıkan olasılıklar pratik birer sınırlamadır. Bir mucize eseri dünyadaki bütün kelebeklerin izini gerçekten sürebilseydin, hava durumunu en azından bir süreliğine kesin olarak tahmin edebilirdin. Kuantum fiziğiyse buna imkân tanımaz."

"Kelebekler belirsizlik ilkesinin kapsama alanına girer, bu yüzden nerede olduklarını bilemezsin mi demek istiyorsun?"

"Sadece kısmen; bundan daha derin. Kuantum fiziğinde aynı deneyi aynı koşullar altında, son kelebeğin kanat çırpışına varıncaya kadar, ikinci kez gerçekleştirsen bile ikinci deneyin kesin sonucunu yine tahmin edemezsin; sadece çeşitli sonuçlara varma olasılığı elde edersin. Birbirinin aynı iki deney farklı sonuçlar verebilir ve verecektir."

"Haa… Bak ne diyeceğim biliyor musun? Bu bir hayli rahatsız edici. Belki de o kadar aptal değilsinizdir."

"Güvenin için teşekkürler."

Kuantum kuramının son ilkesi, ölçüm fikridir. Kuantum mekaniğinde ölçüm etkin bir süreçtir. Bir şeyi ölçme eylemi, gözlemlediğimiz gerçekliği yaratır.[6]

Somut bir örnek verelim: İki kutudan birinde bir ödül olduğunu düşünelim. Kutular kapalı, ses geçirmiyor (bu yüzden ödülün tıkırtısını duyamıyorsun), hava geçirmiyor (kokusunu alamıyorsun); ödülün hangi kutuda olduğunu kutulardan birini açmadan söyleyemiyorsun.

Bunu bir kuantum mekaniği nesnesi olarak betimlemek istersek iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu yazmamız gerekir; bir kısım ödülü soldaki kutuda bulma olasılığını betimler, diğer kısımsa sağdaki kutuda bulma olasılığını. Tıpkı önceki bölüm-

---

6- Werner Heisenberg, ölçüm sonuçlarının *tek* gerçeklik olduğunu, ölçümler arasında bir elektronun nerede olduğundan ya da ne yapıyor olduğundan bahsetmenin hiçbir anlamı olmadığını söyleyecek kadar ileri gitmiştir.

de tavşanların durumlarını ekleyerek bir dalga paketi oluştururken yaptığımız gibi, bunu ödülün sadece soldaki kutuda olmasının dalga fonksiyonlarını birbirine ekleyerek ve sadece sağdaki kutuda olmasının dalga fonksiyonlarını birbirine ekleyerek yapabiliriz.

Şimdi kutulardan birini açtığını ve ödülü bulduğunu, sonra da kutuyu yeniden kapattığını düşün. Yine elinde bir ödül ve iki kutu olacak; ama ödülün konumunu ölçtün. Dalga fonksiyonu neye benzer?

Dalga fonksiyonu artık sadece bir kısımdan oluşur; ödülün soldaki kutuda olduğunu betimleyen kısım; çünkü ödülün tam olarak nerede olduğunu biliyoruz. Ödülü soldaki kutuda bulursan, bir dahaki sefere kutuyu açtığında, orada olması olasılığı yüzde 100'dür; sağdaki kutuda bulma olasılığınsa yüzde 0'dır. Kutuyu açmadan önce dalga fonksiyonunun orada duran diğer kısmı, yaptığın ölçüm sonucu ödülün sağdaki kutuda olma olasılığı ortadan kalktığı için gitti.

Şimdi bu kutuları atalım, ilk çiftle aynı biçimde hazırlanmış iki yeni kutu alalım; yine iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonun olacak. Ama bu sefer ilk kutuyu açman ille de ilk kutu çiftinde aldığın sonucun aynısını vermeyecek. Bu sefer ödülü sağdaki kutuda da bulabilirsin pekâlâ. Açarsan, kutuları kapatıp yeniden açmayı sürdürürsen ödülü hep sağdaki kutuda bulacaksın. Yine iki kısımlı bir dalga fonksiyonundan tek kısımlı bir dalga fonksiyonuna geçeceksin.

Peki, bunda abartacak ne var? Nihayetinde olasılık böyle işler, öyle değil mi? İlk deneyde ödül hep soldaki kutudaydı, ama bilmiyordun; ikinci deneydeyse sağdaki kutudaydı. Ödülün durumu değişmedi, senin onun durumuyla ilgili bilgin değişti.

Kuantum olasılıkları bu şekilde işlemez. Elimizde iki kısımlı bir dalga fonksiyonu olduğunda (bir "süperpozisyon (üst üste gelme) durumu"), bu, nesnenin iki durumdan birinde olduğu

anlamına gelmez; nesnenin aynı anda iki durumda birden olduğu anlamına gelir. Köpeğin ödülü hep soldaki kutuda değildir; sen kutuyu açıp da birinde ya da diğerinde olduğunu buluncaya dek aynı anda hem soldaki hem sağdaki kutudadır.

"Bak bu çok tuhaf. Neden buna inanalım ki?"

"Eh, kuantum mekaniğinin tuhaf yönlerini, kuantum silici denilen bir deneyle gösterebiliriz."

"Ooo! Sevdim bunu! Hadi birkaç kedi silelim!"

"Makroskobik nesneler üzerinde işlemez. Polarize ışık kullanılır bu deneyde, önce onu açıklamam gerek."

"Vay! Neden silemiyoruz?"

"Olabildiğince kısa tutacağım, ama bu önemli bir mevzu. Polarize ışık kuantum etkilerine somut örnekler vermek için eldeki en iyi sistem. Bu bölümde, ayrıca yedinci ve sekizinci bölümlerde ihtiyacımız olacak."

"Eh, peki, öyle olsun. Sonra ben silebileyim de."

"Ne yapabileceğimize bakarız."

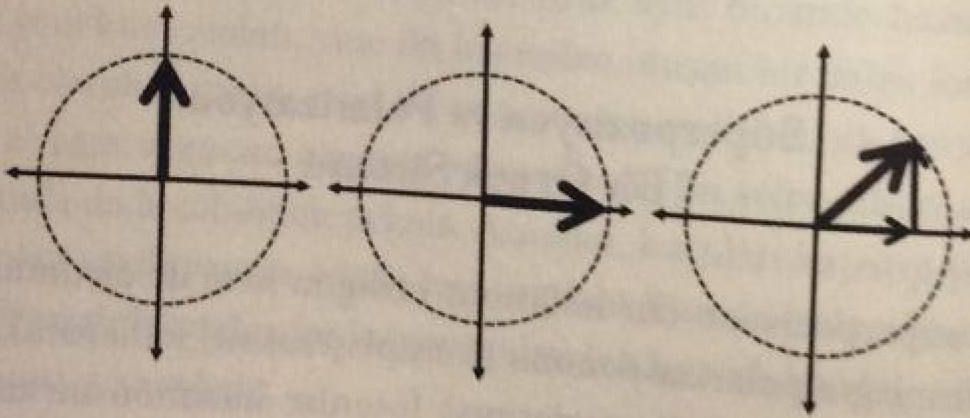
Süperpozisyon ve Polarizasyon: Bir Örnek Sistemi

Hem süperpozisyon durumlarının varlığını hem de ölçümün etkilerini ışığın polarizasyonunu (kutuplaşmasını) kullanarak gösterebiliriz. Polarize (kutuplaşmış) fotonlar kuantum mekaniğinin öngörülerini sınamakta son derece yararlıdır; sonraki bölümlerde tekrar tekrar karşımıza çıkacaklar; bu yüzden ışığın bir dalga olması fikrinden ileri gelen ışığın polarizasyonunu tartışmaya biraz zaman ayırmamız gerekiyor.

Bir dalga, örneğin bir ışık huzmesi, beş özellikle tanımlanır. Bunların dördünden daha önce bahsettik: dalga boyu (dalga örüntüsünde tepeler arasındaki mesafe), frekans (belli bir nok-

tada dalganın saniyede kaç kere salındığı), büyüklük (bir dalganın tepesiyle çukuru arasındaki mesafe) ve dalganın hareket ettiği yön. Beşinci özellik polarizasyondur; polarizasyon temelde dalganın salındığı yöndür. Yürüyüş yapmak için dışarı çıkmış sabırsız bir köpek sahibi, tasmanın kayışını aşağı yukarı sallayarak köpeğin dikkatini çekmeye çalışır; tasmanın kayışında dikey olarak polarize bir dalga oluşur; köpek sahibi tasmayı iki yana salladığında da yatay polarize bir dalga oluşacaktır.

Sallanan bir kayış gibi, klasik ışığın da kendisiyle ilişkili bir salınım yönü vardır. Salınım her zaman hareket yönüne dik açılardadır; ama bunun etrafında herhangi bir yönde olabilir (yani ışığın hareket ettiği yöne göre sol, sağ, yukarı ya da aşağı olabilir). Fizikçiler bir ışık huzmesinin polarize halini genellikle salınım yönünü işaret eden bir okla gösterir; dikey olarak polarize olmuş ışık huzmesi yukarıyı gösteren bir okla, yatay olarak polarize olansa aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi sağ tarafı işaret eden bir okla temsil edilir.



Sol: Dikey polarizasyon yukarıyı gösteren bir okla temsil edilir. Orta: Yatay polarizasyon sağı gösteren bir okla temsil edilir. Sağ: Yatay ile dikey arasında kalan polarizasyon, yatay ve dikey bileşenlerin bir toplamı olarak düşünülebilir.



"Dur bakalım, bu resimler nereden çıktı şimdi?"

"Düşün ki ışık huzmesinin hemen arkasındasın, hareket yönüne bakıyorsun. Ok, dalganın salınım yönünü gösteriyor. Yukarı doğru bir ok dalganın yukarı aşağı hareket edeceğini göreceğin anlamına gelir; sağa doğru bir oksa yanlara hareket edeceğini göreceğin anlamına."

"Yani... Yukarı bakan bir ok yukarı aşağı zıplayan bir tavşanın peşinden koşmaya, sağa bakan bir ok da ileri geri zikzaklar çizen bir sincabı izlemeye benziyor, ha?"

"Tabii bu işe yarar."

"Yukarı ve sağdan başka bir seçenek yok mu?"

"Başka yönlerde de oklar olabilir. Sola bakan bir ok da yanlara salınımı gösterir, ama sağa bakan okla zıt fazdadır."

"Yani sağa bakan ok, önce sağa giden bir sincap, sola bakan ok da önce sola giden bir sincap, öyle mi?"

"Evet. Av hayvanlarında ısrar ediyorsan öyle."

"Av hayvanlarına bayılırım!"



Bir dalganın polarizasyonu yatay ya da dikey olabileceği gibi ikisinin arasında kalan bir açıda da olabilir. Biraz önceki şekilde gösterildiği gibi ara açıları, bir yatay ve bir de dikey parçadan oluşuyorlarmış gibi düşünebiliriz. Bu bileşenlerin her biri toplam dalga kadar yoğun değildir (yani, şekilde okların uzunluğuyla gösterildiği gibi büyüklükleri daha küçüktür); ama birbirlerine eklendiklerinde bir açıda aynı nihai yoğunluğu verirler. Bu eklenmeyi adımların birleşmesi olarak düşünebilirsiniz; tıpkı bir noktadan diğerine ya doğuya doğru üç adım, ardından kuzeye doğru dört adım ya da 37 derece kuzeydoğuya doğru beş adım atarak gittiğimiz gibi.

"Yani ara açı, sağa ve sola zikzak çizerken aşağı yukarı zıpla-

yan bir tavşana benziyor?"

"Evet, öyle."

"Ya da sola ve sağa zikzak yaparken, yukarı aşağı sıçrayan bir sincaba?"

"Bence bu kadar av örneği şimdilik yeter."

"Hiç komik değilsin."

Ara polarizasyonları yatay ve dikey bileşenlerin bir toplamı olarak düşünmek işe yarayan bir numaradır; çünkü ışık polarize edici (kutuplaştırıcı) bir filtreyle karşılaştığında neler olduğunu görmemizi kolaylaştırır. Polarize edici filtreler, belli bir açıyla gelen, örneğin polarizasyonu dikey olan ışığın engellenmeden geçmesine imkân veren aygıtlardır; polarizasyonu bundan 90 derece büyük, yani yatay olan ışığı ise tamamen soğuracaklardır. Bu etkiyi anlamak için tasmalı bir köpeği bir çiti aşarken düşünebilirsiniz. Tasmanın kayışını yukarı aşağı sallarsanız dalga doğruca geçecektir; ama yanlara sallarsanız çitler kayışı engelleyecektir.

Dikey ve yatay arasındaki bir açıdan gelen ışık, dikey duran polarize edici bir filtreye çarptığında, ışığın sadece dikey bileşeni filtreden geçecektir. Bu durumda, öteki tarafa geçen ışığın yoğunluğu, açıya bağlı olarak bir miktar azalır. Küçük açılar söz konusu olduğunda ışığın büyük bölümü filtreden geçer; öbür tarafa geçen huzme, ilk huzmenin dörtte üçü oranında parlak olur. Daha büyük açılar söz konusu olduğundaysa ışığın büyük bölümü engellenir; dikeye 60 derecelik bir açıda filtrenin öbür tarafına geçen huzme, ilk huzmenin ancak dörtte biri kadar parlaktır. Yatay ve dikeyin arasında kalan 45 derecelik bir açıdan gelen ışığın tam yarısı dikey duran filtreden geçecektir.

Filtrenin öbür tarafına geçen ışık, hangi açıyla başlamış olursa olsun, filtrenin durduğu açıda polarize olur. Bu yüzden polarize edici filtrelere genellikle polarize ediciler (kutuplaştırıcılar) denir: Dikey duran polarize edici bir filtreden geçen ışık, yola di-

key polarizasyonla da başka bir açıyla da başlamış olsa öbür taraftan dikey olarak polarize olmuş ışık olarak çıkacaktır. Işığın toplam miktarı baştakinden farklı, ama polarizasyonu polarize edicinin konumuyla aynı olacaktır. Dikey duran bir filtreden geçen ışığın tamamı ikinci bir dikey filtreden geçer; yatay duran bir filtredeyse tamamı engellenir.

"İyi de bütün bunlar neye yarıyor?"

"Kuantum fiziğini göstermekten başka mı? Çok şeye. Işık polarizasyonu son derece yararlı bir şeydir. Kol saatleri, cep telefonları ve televizyonlardaki dijital göstericiler, geçen ışığın miktarını ayarlamak için bir ışık kaynağının önünde duran bir polarize ediciden yararlanır. Polarize edici filtreler güneş gözlüklerinde de kullanılır."

"Güneş gözlükleri mi?"

"Evet ya, seni yürüyüşe çıkardığımda taktığım o güneş gözlükleri aslında polarize edici filtreler. Güneşten gelen ışık polarize değildir; yatay olabileceği gibi dikey de olabilir; ama ışık bir yüzeyin üstüne yansıdığında, hafifçe polarize olma eğilimindedir. Biz yürürken önümüzdeki yoldan yansıyan ışık dikeyden çok yatay polarize olmuştur; bu yüzden de dikey polarize edicileri güneş gözlüğü olarak taktığında bu ışığın büyük bölümünü engellersin."

"İyi de bunun amacı ne? Görmeyi zorlaştırmıyor mu?"

"Aslında yolun parlamasını azaltıyor ve önündeki şeyleri görmeni kolaylaştırıyor."

"Şeyler mi? Yoldaki tavşanlar gibi mi?"

"Evet, onun gibi."

"Benim de polarize güneş gözlüklerim olsa da tavşanları görebilsem!"

"Benim taktıklarım senin kulaklarına uymaz, ama bakarız. Sonra. Önce polarize ışıkla kuantum ölçümünden bahsetmem gerekiyor."

"Ah, evet ya. Kuantum fiziği. Doğru."

Peki, bütün bunlar parçacık olarak ışığa nasıl uygulanır? Birinci bölümün epeyce bir kısmını bir ışık huzmesinin nasıl hem bir foton akışı hem de yumuşak bir dalga olduğunu betimlemeye ayırdık. Son birkaç sayfadır da klasik anlamda polarizasyonu tartışıyoruz. Işık polarizasyonunu kuantum fiziğinde nasıl ele alırız?

Klasik ışık dalgalarıyla uğraştığımızda bir dalganın bir kısmının filtreden nasıl geçebileceğini anlamak kolaydır. Oysa ışıktan fotonlar olarak bahsettiğimizde, filtre ya hep ya hiç demek gibidir. Bir foton filtreden ya geçer ya da filtre onu yutar. Fotonların "parçaları" yoktur.

Fotonlar ile polarize edici filtreler arasındaki ilişkiyi, her fotonun filtreden geçme olasılığının, klasik modele göre toplam dalganın filtreden geçen kısmına eşit olduğunu söyleyerek kuruyoruz. 60 derece dikey polarize edilmiş bir ışık huzmesi dikey bir polarize edici filtreyle karşılaşırsa filtrenin öbür tarafına geçen huzme öncekinin dörtte biri kadar parlak olacaktır; yani foton sayısı, ilk huzmedeki foton sayısının dörtte biri kadar olacaktır. Bu da tek tek her fotonun polarize edici filtreden geçme şansının dörtte bir olduğu anlamına gelir.

Filtreden geçen her fotonun polarizasyonu filtre tarafından belirlenmiş olacaktır. Dört fotondan ancak biri, dikey duran polarize edici filtreden geçebilir; ama bu fotonların her biri ikinci bir dikey filtreden geçecek, hiçbiri de yatay bir filtreden geçemeyecektir.

O halde "dikey" ve "yatay" tek bir fotonun polarizasyonunun izinli durumlarıdır; bir filtre kullanarak polarizasyonu ölçtüğümüzde fotonu arada bir yerde değil, bu iki halden birinde buluruz (ya dikey filtreden geçer ya da dikey filtre onu soğurur).

Bu yüzden polarize fotonlar, kuantum mekaniğinin kilit ilke-

lerine bakmak için mükemmel bir sistem sunar. Tek tek her foton, iki izinli duruma, yatay ve dikey polarizasyona denk gelen iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu olarak betimlenebilir. Bu dalga fonksiyonu, fotonun polarize edici filtreden geçme olasılığını verecektir; bir filtreyle polarizasyon ölçümünü gerçekleştirmeniz sonrasında, fotonlar izinli durumların sadece birindedir. Tek bir fotonun polarize edici filtreden geçmesi kuantum fiziğinin bütün temel yönlerini gösterir. Sonuçta polarize fotonlar, kuantum fenomenlerini gösteren birçok deneyde kullanılmıştır.

"Bir dakika, ben şimdi bütün bunları bir doğrultayım. Yatay ile dikey arasındaki bir açıda bulunan bir foton süperpozisyon durumunda, öyle mi? Bu fotonu polarize edici filtreye göndermek de onu ölçmekle aynı şey mi?"

"Evet. Tek tek polarize edilmiş fotonları kullanarak kuantum süperpozisyonunun ve ölçümün bütün yönlerini; dalga fonksiyonlarını, izinli durumları, olasılığı ve ölçümü elde etmiş oluyorsun."

"Ama klasik bir dalga olarak ışıktan bahsettiğinde, bütün bunların aynı biçimde işlediğini söyledin sanırım."

"Evet, öyle. Sonuçta varılan nokta, klasik polarize dalga tanımıyla aynı."

"İyi de o zaman mesele ne peki? Kuantum tuhaflığına dair verdiğin büyük örnek, klasik sonuçlar üreten bir şey oluyor yani?"

"Yo, hayır. Demek istediğim benim büyük örneğim bu değil. Kuantum tuhaflığına dair büyük örnek bir sonraki kısımda."

"Eh, peki, devam et o zaman."

Bir Fotonu Ölç(me)mek: Kuantum Silici

Kuantum süperpozisyon durumlarının tuhaflığını göstermenin en iyi yollarından biri, kuantum silici denilen bir deneydir. Kuantum silici, tek parçacıklı kuantum fiziğinde tuhaf olan her şeyi tek bir deneyde kapsar: parçacık-dalga ikilemi, süperpozisyon durumları ve ölçümün etkin niteliği. Kuantum siliciyi anlarsanız kuantum fiziğinin temel unsurlarını anlamışsınız demektir.

Yıllar içinde kuantum silici deneylerinin birçok farklı biçimi yapılmıştır; ama bu deneylerin en basiti Young'ın çift yarık deneyinin bir biçimiyle başlar.[7] Bir çift dar yarıktan bir foton huzmesi gönderecek olursak yarıkların öbür tarafında belli noktalarda tespit edilmiş tek tek fotonlardan oluşan (sonraki sayfada şekilde gösterildiği gibi) bir girişim örüntüsü görürüz. Bu örüntüyü, ancak ışık aynı anda her iki yarıktan birden geçtiği için görebiliriz. Yarıklardan birini kapatırsak girişim örüntüsü kaybolur; biz de ışığın kapatılmamış yarıktan geçmesi sonucu fotonların geniş bir alana dağıldığını görürüz.

Gördüğümüz girişim örüntüsü, fotonların bir süperpozisyon durumunda olduğunu gösterir: Fotonların her birini betimleyen dalga fonksiyonunun iki kısmı vardır; biri sol yarıktan geçen foton, diğeri de sağ yarıktan geçen foton içindir. Fotonların her biri aynı anda iki yarıktan da geçmiştir; gördüğümüz örüntüyü oluşturan da bu iki bileşen arasındaki girişimdir. Elinizde iki kısımdan oluşan dalga fonksiyonları varsa her zaman girişim örüntüleri oluşur. Yarıklardan birini kapattığımızda sadece tek kısımlı bir dalga fonksiyonumuz olur; süperpozisyon bozulmuş olur ve girişim örüntüsü de olmaz.

7- *Scientific American*'ın Nisan 2007 sayısında, evde bir lazer kalemi, alüminyum folyo, tel, birkaç parça ucuz polarize edici film kullanarak yapabileceğiniz bir kuantum silici deneyi anlatılmıştır.



Tek tek fotonların oluşturduğu girişim örüntüsü. Soldan sağa 1/30 saniye, 1 saniye, 100 saniye. Princeton Üniversitesi'nden Lyman Page'in görüntüleri kendisinin izniyle yayınlanmıştır.



"Bir dakika, ben girişim iki farklı foton arasında sanıyordum; sol yarıktan geçenle sağ yarıktan geçen arasında, öyle değil mi?"

"Böyle düşünmek kolay; çünkü genellikle aynı anda çok sayıda foton göndeririz. Ama meselenin böyle olmadığını yarıklara bir seferde bir foton göndererek gösterebiliriz."

"İyi de tek bir foton nasıl girişim örüntüsü oluşturur ki?"

"Oluşturmaz. Tek tek her foton perdede belli bir konumda tek bir nokta olarak belirir; tek tek fotonların nerede belireceği rastgeledir."

"Yine şu olasılık meselesi."

"Aynen öyle. Tek tek fotonlar rastgeledir; ama deneyi tekrar tekrar yaparsan, bütün fotonların izini sürersen, birbirlerine eklenip bir girişim örüntüsü oluşturduklarını görürsün. Bazı yerlerde tek bir foton bulursun, bazı yerlerde foton bulma şansın kesinlikle yoktur. Genel örüntü, kendisiyle girişen tek tek her fotonun dalga fonksiyonundan aldığın olasılık dağılımıyla belirle-

nir."

"Yani tek bir parçacık, ama iki yarıktan da geçiyor, sonra öbür tarafta tek bir yerde beliriyor, öyle mi?"

"Kesinlikle."

"Bu çok tuhaf."

"Kuantum fiziği bu."

Ama yarıkların birini kapatmak yerine iki yarığı da biri dikey, öbürü yatay farklı polarize edici filtrelerle kapattığımızı düşünelim. Sol yarığa sadece yatay polarize olmuş ışığın geçeceği bir filtre koyalım, sağ yarığa da sadece dikey polarize olmuş ışığın geçeceği bir filtre koyalım. 45 derece açıyla dikey polarize edilmiş ışık gönderirsek ışığın yatay polarize edici filtreden geçme olasılığı da dikey polarize edici filtreden geçme olasılığı yüzde 50'dir; dolayısıyla yarıkların her birinden ışık geçer.

Filtrelerin bu biçimde düzenlenmesi, ışığın hangi yarıktan geçtiğini ölçmenin bir yolunu sunar. Detektörümüzün önüne dikey bir polarize edici koyarsak sadece sağdaki yarıktan geçen ışığı görürüz; yatay polarize edici koyarsak sadece soldaki yarıktan geçen ışığı görürüz. Detektörün önündeki polarize edici bize fotonun hangi yarıktan geçtiğini söyler; sanki yarığın yanına bir detektör koymuşuz ve konumu doğrudan ölçmüşüz gibi.

Bunu yaptığımızda ne olur? Yarıkların önündeki filtrelerle ışı-
ğa baktığımızda girişim örüntüsüne dair bir emare görmeyiz. Işı-
ğın polarizasyonunu ölçtüğümüzde ışığın hangi yarıktan geçtiği-
ni ölçeriz; bu da bizi bir girişim örüntüsü yaratan iki kısımlı dal-
ga fonksiyonundan alıp girişim örüntüsü yaratmayan tek kısımlı
dalga fonksiyonuna getirir. Fotonun hangi yarıktan geçtiğini ölç-
mek dalga fonksiyonunda, fotonun diğer yarıktan geçişini betim-
leyen kısmı ortadan kaldırır; tıpkı kutulardan birini açmamın,
dalga fonksiyonunda, ödülün diğer kutuda olmasını betimleyen
kısmı ortadan kaldırması gibi.

Detektöre polarize edici filtre takmamıza bile gerek yok;

ların üzerine polarize ediciler koyarak fotonların her birini "işaretlemiş" oluruz; her fotonun hangi yarıktan geçtiğini ölçebilecek olmamız örüntüyü ortadan kaldırmaya yeter. Kutudaki ödül örneğinde, bu, içinde ödül olan kutunun üstüne birinin "ödül" yazmasına benzer; süperpozisyonu ortadan kaldırmak için kutuyu açmamıza artık gerek yoktur.

Örüntünün ortadan kalkması başlı başına tuhaf bir şeydir, ama işler daha da tuhaflaşır: Yarıkların ardından çıkan ışığa bakmak için yatay ya da dikey polarize edici yerine 45 derece açılı bir polarize edici kullanarak ölçümü geri alabiliriz. Böyle yaparsak yeniden girişim örüntüsü görürüz! 45 derece açılı polarize edici ya yatay ya da dikey polarizasyonu geçirecektir, her birinin olasılığı yüzde 50'dir; bu da polarize edicinin ardında tespit ettiğimiz ışığın iki yarıktan birinden ya da yarıkların ikisinden birden geçmiş olabileceği anlamına gelir. Bu üçüncü filtre fotonu işaretleyerek edindiğimiz bilgiyi "siler"; tıpkı birinin ödülün bulunduğu kutunun üzerindeki etiketi kaldırması gibi. Fazladan polarize edicinin işe dahil edilmesi sonucu, sanki ölçümü hiç yapmamış gibi oluruz. Dalga fonksiyonunun ikinci kısmı ortadan kaldırılmamış olur ve girişimi görebiliriz.

Kuantum silici deneyi, kuantum mekaniğinin kilit ilkeleriyle ilgili tuhaf olan ne varsa kapsar. Fotonların her biri aynı anda iki yarıktan birden geçerken girişim örüntüsünün belirmesi, kuantum durumlarının süperpozisyonunu gösterir; polarize edici filtreler koyduğumuzda girişim örüntüsünün kaybolması ve yeniden belirmesi de kuantum ölçümünün etkin niteliğini gösterir. Tıpkı, parçacığın hangi yarıktan geçtiğini ölçebilmemizin deneyin sonuçlarını tümüyle değiştirmek için yeterli olması gibi.

Gördüğün Şey Olan Her Şeydir: Kopenhag Yorumu

Bu dört fikir; dalga fonksiyonları, izinli durumlar, olasılık ve ölçüm, kuantum kuramının merkezi unsurlarıdır. Fotonlarla[8] yapılan deneylerde gördüğümüz girişim örüntüleri, kuantum parçacıklarının gerçekten de aynı anda birçok durumda bulunduğunu doğrulamaktadır. Kuantum silici deneyinde girişim örüntüsünün ortadan kaybolup yeniden belirmesi, ölçümün etkin bir süreç olduğunu, sonraki deneylerde neler olacağını belirlediğini doğrulamaktadır.

Fakat yine de bir problemimiz vardır; çünkü bir olasılıktan bir ölçümün sonucuna nasıl geçileceğini betimleyen matematiksel bir süreç yoktur. Fiziksel bir nesnenin izinli durumlarının dalga fonksiyonlarını hesaplamak için Schrödinger denklemini kullanırız; olasılık dağılımını hesaplamak için dalga fonksiyonunu kullanırız; ama tek bir ölçümün kesin sonucu öngörmek için olasılık dağılımını kullanamayız. Bir ölçüm yapma sürecinde gizemli bir şey olur.

"Ölçüm problemi", kuantum mekaniğine dair birbiriyle çekişen yorumların kökeninde, fiziğin felsefe olmaya zorlandığı noktada yatar. Tekrarlanan ölçümlerin sonuçlarının olasılıklarını hesaplamak için bütün yorumlar aynı yöntemleri kullanır. Birbirlerinden ayrı düştükleri tek nokta, dalga fonksiyonunun aynı anda iki (ya da daha fazla) halden oluştuğu durumun, yani kuantum süperpozisyonu halinin bir adım ötesine, nesnenin sadece ve sadece bir tek halde bulunmasına, tek bir ölçümün verdiği klasik sonuca nasıl geçildiğine getirdikleri açıklamalardır.

Kuantum kuramı için ileri sürülen ilk yorum Niels Bohr ve

8- Elektronlarla, atomlarla, moleküllerle…

Danimarka'da görev yaptığı enstitüdeki çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir; bu yüzden Kopenhag yorumu olarak bilinir. Kopenhag yorumu kuantum mekaniğinde ölçüm problemini tek tek vakalar bazında ele alan bir yaklaşımdır. (Kimi yönleriyle Bohr'un yaklaşımının tipik bir örneğidir.[9])

Kopenhag yorumu makroskobik ve mikroskobik fizik arasına katı bir sınır çizerek süperpozisyon ve ölçüm sorunlarından kaçınmaya çalışır. Mikroskobik nesneler; fotonlar, elektronlar, atomlar ve moleküller kuantum mekaniği kurallarının hükmü altındadır; ama makroskobik nesneler, yani köpekler, fizikçiler, ölçüm aletleri klasik fiziğin hükmü altındadır. İkisi arasında mutlak bir ayrım vardır; makroskobik bir nesnenin bir kuantum tarzında davrandığını göremezsiniz.

Kuantum ölçümü, makroskobik ölçüm aygıtının mikroskobik bir nesneyle etkileşimini gerektirir ve bu etkileşim mikroskobik nesnenin durumunu değiştirir. Buna getirilen olağan tanım, dalga fonksiyonunun tek bir duruma"çöktüğüdür." Kopenhag yorumuna göre bu "çökme", dalga fonksiyonunun birçok olası ölçüm sonucunun bulunduğu yayılmış bir kuantum halindeyken fiilen değişip ölçülen tek bir değerin bulunduğu bir durum almasıdır.[10]

Kopenhag yorumunun en uç biçimlerinde, çöküş makroskobik bir ölçüm aygıtı gerektirmekle kalmaz, ölçümü not alacak bilinçli bir gözlemcinin varlığını da gerektirir. Bu bakış açısına göre

9- Son bölümde söylediğimiz üzere Bohr'un fiziğe ilk büyük katkısı, basit hidrojen kuantum modeli olmuştu. Bu model, kuantum ve klasik fizik fikirlerinin hiçbir net açıklama olmaksızın bir araya getirilmiş ve bir şekilde doğru sonucu veren bir harmanıydı. Bohr'u bunu ileri sürmeye itenin ne olduğu da belirsizdir. Gelgelelim bu model, bu kitapta tartıştığımız modern kuantum kuramına giden yolu göstermişti.

10- "Çöküş" kelimesi, Kopenhag tipi yorumlarla kuvvetli bir ilişki içinde olmuştur. Çok bileşenli bir dalga fonksiyonunun tek bir ölçüm sonucuna yansıtılması problemiyle ilgili, dalga fonksiyonunda fiziksel bir değişimi öngörmeyen başka yaklaşımlar da vardır. Bu "çöküşsüz" yorumların en bilinen örneğini dördüncü bölümde göreceğiz.

bir ormanda devrilen bir ağaç, biri (ya da bir köpek) gelip onun düştüğünü gözleyinceye kadar aslında düşmemiştir.

"Bir dakika, dur bakalım, bu nesnel fiziksel gerçeklik fikrini reddetmek anlamına gelmiyor mu?"

"En aşırı biçimleriyle evet. Werner Heisenberg herhalde Kopenhag şürekâsının en radikal ismiydi ve elektronların bağımsız bir gerçekliği olduğundan bahsetmenin bir hata olduğunda kuvvetle ısrar ediyordu. Heisenberg'in bakış açısına göre hakkında gerçekten konuşabileceğimiz şeyler yalnızca özel ölçümlerin sonuçlarıdır. Ölçümler arasında elektronların ne yaptığından bahsetme fikrini reddediyordu."

"Hmm... Bu da çok radikalmiş. Sanırım bundan hoşlanmadım."

"Yalnız değilsin, inan bana."

Kopenhag yorumu birçok sorun doğurur; bunlardan biri de mikroskobik ve makroskobik fizik arasında mutlak bir ayrım yapmak için belirgin bir sebep olmamasıdır. Daha önce de gördüğümüz gibi, nesneler daha büyük ve daha karmaşıklaşırken kuantum davranışlarını tespit etmek zorlaşsa da biraz daha büyük moleküllerde dalga davranışını görmek yine de mümkündür. Makroskobik nesnelerin, kuantum dalga fonksiyonları ve kuantum kurallarıyla tanımlanabilmesi gerekir.

Başka bir sorun da dalga fonksiyonunun çökmesiyle ilgili olarak neyin ya da kimin "gözlemci" sayılacağıdır. Ölçümün gerçekten "geçerli olması" için birinin ölçüm sonucunu gözlemesinin gerekmesi, "bilinçliliğe" bir tür mistik nitelik atfediyormuş gibi görünmektedir; bu fikir de birçok fizikçiyi rahatsız eder.

"Çöküş" fikrinin kendisi bile sorunludur. Çöküşü betimleyecek bir matematiksel formül yoktur; bir dalga fonksiyonunun ölçümler arasında nasıl değiştiğini betimlemek için Schrödinger denklemini kullanabilirsiniz; ama "çöküş" sürecini betimleme-

nin bir yolu yoktur. Tek yapabileceğiniz bir sonuç seçmek ve ölçüm sonrasında yeni bir dalga fonksiyonuyla baştan başlamaktır. Birçok fizikçi bunu, insanın içini rahatlatamayacak kadar büyülü bulur.

Kopenhag yorumundaki sorunların en meşhur örnekleri, şu ünlü "Schrödinger'in Kedisi" düşünce deneyi ve onun ardından gelen "Wigner'in dostu" düşünce deneyidir. Erwin Schrödinger, kuantum kuramının yaratılmasında oynadığı role rağmen, tıpkı Einstein gibi kuramın yorumlarıyla ilgili derin felsefi sorunlar yaşıyordu ve alana hepten yabancılaşmıştı. Denkleminden hiç tartışmasız daha meşhur olan Schrödinger'in kedisi, fizikçinin Kopenhag yorumunun saçmalığını göstermeye çalıştığı şeytanca bir düşünce deneyidir. Schrödinger, içinde bir saat içinde yüzde 50 bozunma olasılığı olan radyoaktif bir atomun ve atomun bozunması halinde zehir salacak bir aygıtın bulunduğu kapalı bir kutuya bir kedi yerleştirdiğini düşünmüştü. Bir saat sonra kedinin hali ne olur diye soruyordu.

Schrödinger'in dikkat çektiği üzere Kopenhag yorumuna göre, kediyi betimleyen dalga fonksiyonunda eşit oranlarda "diri" ve "ölü" kısımları olacaktı. Bu durum, deneyi yapan kişi kutuyu açıncaya kadar sürecek; kutu açıldığında kedi iki halden birine çökecekti.[11] Ama bu tümüyle saçma görünüyordu; bir kedinin aynı anda hem ölü hem diri olması fikri uçuktu. Gelgelelim fotonlar açısından oluyormuş gibi görünen şey tam da budur.

Kopenhag yorumu, bir ölçüm yapılıncaya kadar fiziksel gerçekliğin var olmadığını söylüyormuş gibi de görünür; bu da kendine özgü felsefi sorunlar doğurur. Eugene Wigner kedi deneyine

---

11- Ya da İngiliz yazar Terry Pratchett'ın *Lords and Ladies* adlı romanında gayet sevimsiz bir kediye uyarlayarak betimlediği üzere: "Teknik olarak bir kutuya kilitlenmiş bir kedi diri de olabilir ölü de. Bakıncaya kadar bilemezsiniz. Aslında kutuyu açma eylemi kedinin durumunu belirleyecektir; ama bu durumda kedinin olabileceği üç durum vardır: Diri, Ölü ve Kafayı Yemiş." (Harper, s. 226)

bir katman daha ekleyip deneyin, neler olduğunu kendisine daha sonra anlatan bir dost tarafından yapıldığını düşünerek bu sorunu öne çıkarmıştır. Wigner dalga fonksiyonunun ne zaman çöktüğünü sormuştur: Dostu kutuyu açtığında mı yoksa daha sonra Wigner sonucu duyduğunda mı? Ormandaki bir ağaç, köpeğiniz size ağacın devrildiğini söylemeden önce gerçekten devrilmiş midir?

Kopenhag yorumunun bu sorulara verdiği cevapların hiçbiri felsefi olarak tatmin edici değildi. Kuantum mekaniği mikroskobik nesnelerin ve nesne topluluklarının davranışlarını betimleme konusunda dikkat çekici bir iş çıkarsa da gördüğümüz dünya inatçı, çıldırtıcı bir klasiklik gösterir. Basit kuantum nesnelerinden gündelik nesnelerin daha büyük dünyasına geçerken gizemli bir şey olur. Mikroskobik ile makroskobik arasında mutlak bir ayrıma gidilmesinde ısrar eden Kopenhag yaklaşımı, sorudan kaçtığı gerekçesiyle birçok fizikçiyi çarpmıştır: Ne olduğunu söyler, ama nedenini söylemez.

Kuantumdan klasiğe geçişin en iyi nasıl ele alınabileceği canlı tartışmalara konu olmayı sürdürmektedir. Gelecekteki bir kuram, bir kuantum nesnesini ölçtüğümüzde tam olarak ne olduğuna dair ayrıntılı bir anlayışa yol açabilir. O zamana kadar, kuantum mekaniğinin çeşitli yorumlarından birine bağlanacağız.

"Bu yorumu da pek sevdiğimi sanmıyorum. Fazlasıyla tekbenci, değil mi?"

"Yalnız değilsin. Bugünlerde Kopenhag yorumundan gerçekten memnun olan pek fazla fizikçi yok."

"Peki, sen hangi yorumu beğeniyorsun?"

"Ben mi? Ben 'çeneni kapa hesapla' yorumuna meylediyorum. Bu yorumun isim babasının Richard Feynman[12] olduğu söyleni-

12- Feynman yirminci yüzyılın ikinci yarısında bir fizikçinin edebileceği bütün zekice lafların sahibi olarak görülür. Ama "çeneni kapa hesapla" muhtemelen ona ait değildir; matbu olarak ilk kez David Mermin'in

yor bazen; ama ana fikri düşünmekten kaçınmaktır. Kuantum mekaniği bize deneylerin sonuçlarını hesaplamak için çok iyi araçlar sunar; ölçüm sırasında ne olduğu sorusunun felsefeye bırakılması da herhalde daha iyi olur."

"Bunu da pek beğenmedim. Parmaklar olmadan hesap makinesiyle çalışmak zor."

"Eh, her türden farklı yorum mevcut; çoğul dünyalar yorum var, David Bohm'un yerel olmayan mekaniği var, 'işlemsel yorum' denilen bir şey var. Kuantum mekaniğinin, kuantum mekaniği üzerine derin düşünen insan sayısı kadar yorumu var neredeyse."

"Çoğul dünyaları yorumu beğendim. Bundan bahsetmelisin."

"İyi fikir. Bir sonraki bölüm."

"Biliyordum."

Physics Today'deki köşesinde (Nisan 1989, s. 4) görülmüştür; Mermin

IV

Çok Dünya Çok Ödül: Çoğul Dünyalar Yorumu



Bilgisayarın başında oturmuş bir şeyler yazıyordum ki Emmy ayaklarımın dibinde bitiverdi. Bir de baktım ayaklarımın etrafını, yeri kokluyor.

"Ne yapıyorsun sen orada?"

"Biftek arıyorum!" diyor kuyruğunu umutla sallayarak.

"Orada biftek olmadığına gayet eminim," diyorum. "Bilgisayar başında hiç biftek yemedim ve tabii ki yere de hiç düşürmedim."

"Başka bir evrende düşürdün," diyor hâlâ koklayarak.

İçimi çekiyorum. "O küçük köpek beynin şimdi hangi abes kuramla iştigal ediyor acaba?"

"Eh, bilgisayar başında biftek yemen mümkün, değil mi?"

"Evet, biftek yerim, bazen de bilgisayar başında yerim, evet, elbette."

"Bilgisayar başında biftek yemiş olsaydın yere de muhtemelen bir parça düşürmüş olurdun."

"Bilmiyorum, acaba düşürür müydüm?"

"Moruk, seni yerken gördüm." Evet, köpek bana "moruk" diyor. İlerde terbiye dersi aldırabilirim.

"Peki, tamam, o olasılığı tanıyalım."

"İşte bu yüzden de yere biftek düşürmüş olman mümkün. Everett'in çoğul dünyalar kuantum mekaniği yorumuna göre de bu yere biftek *düşürdüğün* anlamına gelir. Demek ki yapmam gereken tek şey onu bulmak."

"Teknik olarak, çoğul dünyalar yorum, evrenin tek taraflı evrilen dalga fonksiyonunda benim yere biftek düşürdüğüm bir kol olduğunu söyler."

"Hmm... Evet. Doğru. Yani benim tek taraflı her ne karın ağrısıysa onu bulmam lazım."

"Ama mesele şu ki dalga fonksiyonunun bir tek kolunu algılayabiliyoruz."

"Belki *sen* sadece bir kolunu algılayabiliyorsun. Benim burnum çok iyidir. Fazladan boyutları koklayarak bulabilirim. Kötü sincaplarla dolu boyutlar. Keçi sakallılarla."

"O *Uzay Yolu*, bilim değil; hem sonra fazladan boyutlar tümüyle farklı bir şey. Çoğul dünyalar yorumunda, dalga fonksiyonunun kolları arasında yeterince uyum bozulması olduysa fonksiyonun farklı kısımları arasında girişim olması hiç olası değildir; birbirinden kesinlikle ayrılmış, birbirine kesinlikle açılamayan evrenlerdir."

"Uyum bozulması derken ne demek istiyorsun?"

"Diyelim ki burada bir parça biftek var; sallama kuyruğunu, varsayımsal bir biftekten bahsediyorum; kuantum mekaniği, bu bifteği yere düşürür sonra kaldırıp alırsam düşen biftek parçasını betimleyen dalga fonksiyonu ile düşmeyen biftek parçasını betimleyen dalga fonksiyonu arasında bir girişim olabileceğini söyler. Tabii ki düşürmem yalnızca bir olasılık olduğundan fonksiyonun bu iki parçasına da gerek vardır."

"Ne demek istiyorsun?"

"Bunun nasıl görüneceğinden hiç emin değilim. Bak, aslında mesele şu ki bu hiç önemli değil. Biftek sürekli çevresiyle etkile-

şim halindedir; havayla, masayla, yerle..."

"Köpekle!"

"Her neyse. Bu etkileşimler esasen rastgeledir ve ölçülmemiştir. Bifteğin farklı parçalarında dalga fonksiyonlarında değişikliklere neden olurlar, bu değişiklikler de dalga fonksiyonlarının artık hiç girişmemesine neden olur. Bu sürece uyum bozulması denir ve çok hızlı gerçekleşir."

"Ne kadar hızlı?" diye soruyor umutla.

"Tam olarak duruma bağlı, ama kabaca bir tahminle muhtemelen 10^{-30} saniye ya da daha az bir sürede."

"Ha." Biraz sönüyor. "Eh, bu çok hızlıymış."

"Öyle. Uyum bozulması gerçekleştiğinde de dalga fonksiyonunun farklı kolları artık birbirleriyle etkileşim kuramaz. Bu da aslında, farklı kolların birbirlerine hiçbir şekilde ulaşamayan, açılamayan, tamamen ayrı evrenler haline gelmesi demektir. Diğer "evrenler"de olan şeyler bizim evrenimizde olup bitenleri kesinlikle etkilemez."

"Adı her neyse onun neden yalnızca bir kolunu görüyoruz?"

"Ah, işte büyük soru. Kimse gerçekten bilmiyor. Bazıları bunun, kuantum mekaniğinin aslında eksik olduğu anlamına geldiği görüşünde; kuantum kuramının temelleri ve yorumlarıyla ilgili araştırmalar yapan koca bir bilim insanları camiası var. Önemli olan şu ki bu evrende masamın altında biftek bulman hiçbir şekilde mümkün değil, o yüzden lütfen oradan çık."

"Ah. Peki." Masamın altından çıkıyor, başı önünde, kuyruğu sarkmış.

"Hey, işin aydınlık tarafına bak," diyorum. "Benim bir versiyonumun yere bir parça biftek düşürdüğü evrende, senin de bir versiyonun var."

"Öyle mi?" Başını dikiyor.

"Öyle ya. Hem sen becerikli bir avcısın, muhtemelen ben yerden kaldıramadan bifteği alırsın."

"Ya?" Kuyruğunu sallamaya başlıyor.

"Ya. Yani bifteği düşürdüğüm evrende, sen onu mutlaka yersin."

"Ooo!" Kuyruğunu çılgınca sallıyor. "Bayılırım bifteğe!"

"Bilirim, bayılırsın." Üzerinde çalıştığım belgeyi kaydediyorum. "Bak ne diyeceğim? Hadi yürüyüşe çıkalım, ne dersin?"

"Ooo! İyi fikir!" Fırlıyor, arka kapıya ve tasmaya giden basamaklardan iniyor.

Önceki bölümde tartıştığımız Kopenhag yorumundan pek az fizikçi tam anlamıyla memnundur. Her biri kuantum ölçümü problemiyle uğraşmanın daha tatmin edici bir yolunu bulmaya çalışan çok sayıda alternatif yorum ileri sürülmüştür. Bu yorumların en ünlüsü, genel olarak çoğul dünyalar yorum olarak bilinir; olayların gördüğümüz evrende olduğundan farklı bir yol izlediği neredeyse sonsuz sayıda evrenin varlığını öngörmesi sayesinde, fizikçiler arasında değilse de pop kültürde baskın bir konuma gelmiş bir yorumdur bu. Muhteşem bir bilim kurgu fikridir; kitaplarda, filmlerde karşımıza çıkar; *Uzay Yolu*'nun, keçi sakallı kötücül bir Spock'ın bulunduğu meşhur bölümünde olduğu gibi.

Bu bölümde çoğul dünyalar yorumundan ve bu yorumun, Kopenhag yorumunun doğurduğu bazı sorunları nasıl ele aldığından bahsedeceğiz. Ayrıca ortamla nesne arasında dalgalanan ilişkilerin dalga fonksiyonunun farklı kısımları arasındaki girişimin etkilerini gölgelediği, "uyum bozulması" (decoherence/zıt fazlılık) olarak bilinen fiziksel süreci tartışacağız. Uyum bozulması kuantum mekaniğinin modern kavranışı açısından merkezi önemdedir; kuantum fiziğinin mikroskobik dünyasından gündelik nesnelerin klasik dünyasına geçişi anlamakta kritik bir etken olabilir.

Sonra Bir Ölçüm Ortaya Çıkar: Kopenhag Yorumunun Sorunları

Kopenhag yorumunun en azından bir tek fizikçi için açık arayla en rahatsız edici unsuru, bir niceliği ölçtüğünüzde neler olduğunu betimleyen matematiksel bir prosedürden yoksun olmasıdır. Schrödinger denklemi, ölçümler arasında dalga fonksiyonuna ne olduğunu hesaplamanızı mümkün kılar; ama Kopenhag yorumu, ölçüm yapıldığı anda normal fiziğin durduğunu; bilinen hiçbir matematiksel denklemin dahil olmadığı bir şekilde, tek bir sonucu seçen bir şey olduğunu söyler.

Kopenhag yorumunun tek tek vakaları dikkate alan niteliği, mikroskobik fizik ile makroskobik fizik arasında yaptığı keyfi ayrım ve o gizemli "dalga fonksiyonu çöküşü" muazzam derecede rahatsız edicidir; çünkü modern kuramsal fiziğin bütün projesi dünyanın tek bir tutarlı matematiksel tanımını bulmaktır. Şu açıklanamayan dalga fonksiyonu çöküşü süreci, Sidney Harris'in meşhur karikatürünü hatırlatıyor: Bir bilim insanı bir problemin ikinci adımını anlatırken "Sonra bir mucize olur" diye yazar. Normal bilimde mucizelere yer yoktur; Kopenhag yorumunun çöküş fikri de insana rahat vermeyecek kadar mucizevidir.

Çoğu fizikçi (özellikle de deneyciler) dalga fonksiyonunun çökmesi fikrini, hesaplamayla ilgili kestirme bir yol olarak kullanmaya; fiziksel dünyayı tahmin edip ölçme işine devam etmeye razıdır; kuantum kuramı fiziksel dünya için şaşırtıcı derecede iyi işler. Bu "çeneni kapa hesapla" yorumunda, kuantum ölçümü için tutarlı bir açıklama bulma problemi felsefecilerin uğraşması için bir kenara bırakılır. Nihayetinde daha iyi bir kuram ortaya çıkabilir; ama o zamana kadar elimizdekiyle yapabileceklerimizi yapmamız gerekir. (Anlaşılan yapabileceklerimiz de epeyce fazladır.)

Ölçümün niteliği, kuantum kuramının ilk günlerinden beri

bir problem olmuştur; birkaç fizikçi de her zaman bu meseleler üzerine daha derin düşünmeyi tercih etmiştir. Bu fizikçilerin birçoğuna göre, dalga fonksiyonunun "çökmesi"ne net bir açıklama getirmemesi, Kopenhag yorumunun temelde kusurlu olduğunu gösterir. Bu yüzden de bu fizikçiler hep alternatif bir yorum aramışlardır.

Çöküş Yok:
Hugh Everett'in Çoğul Dünyalar Yorumu

1957'de, Princeton'da Hugh Everett III adlı bir yüksek lisans öğrencisi, "çöküş" problemine basitliğiyle nefes kesen bir çözüm önerdi. Everett diyordu ki dalga fonksiyonunun çökmesini betimleyecek matematiksel bir yöntem olmamasının sebebi dalga fonksiyonunun çökmesi diye bir şeyin olmamasıdır. Dalga fonksiyonu her zaman, her yerde Schrödinger denklemine göre gelişir; ama evrenin büyük dalga fonksiyonunun sadece küçük bir parçasını görürüz.

Bunun nasıl işlediğini görebilmek için önceki bölümde verdi-
ğimiz örneğe, kutulara konmuş ödül örneğine geri dönelim. İki
kutudan birinde ödül olduğunu düşünelim; Kopenhag yorumu-
nun çizdiği tablo, en başta, ödül için iki kısımdan oluşan bir dal-
ga fonksiyonu olduğunu söyler. Bu dalga fonksiyonu zaman için-
de Schrödinger denklemine göre değişir. Bir kutuyu açıp köpeğin
kutunun içine bakmasına izin verirsek dalga fonksiyonu, ödülün
ya soldaki ya sağdaki kutuda bulunmasına bağlı olarak anında iki
halden birine çöker. Gelecekteki değişiklikleri tahmin çalışmala-
rına Schrödinger denklemiyle, yeni tek parçalı dalga fonksiyonu-
nu kullanarak başlarız.

Everett'in çizdiği tablodaysa çöküş yoktur. Dalga fonksiyonu bir süperpozisyon durumuyla başlar; ödülün hem soldaki hem

sağdaki kutularda bulunmasına denk gelen, iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonu vardır; kutulardan birini açtığımızda bu süperpozisyon durumu daha da büyür. Artık süperpozisyon sadece ödülü değil, ödülün konumunu ölçen köpeği de içermektedir. Dalga fonksiyonunun kısımlarından biri "sol kutudaki ödül ve ödülün sol kutuda olduğunu bilen bir köpek", diğeri ise "sağ kutudaki ödül ve ödülün sağ kutuda olduğunu bilen bir köpek"tir. Geleceğe doğru ilerledikçe bu süreç devam eder. Deneydeki bir sonraki adım köpeğin ödülü yemesi ya da yememesiyse (bu düşük olasılıklı bir sonuçtur, ama mümkündür), dalga fonksiyonunun dört parçası olur: sol kutudaki ödülü yiyen köpek, sol kutudaki ödülü yemeyen köpek, sağ kutudaki ödülü yiyen köpek, sağ kutudaki ödülü yemeyen köpek.

Karmaşıklıktaki bu artış, matematiksel sembollerle gösterildiğinde daha da çarpıcıdır. Sadece ödül için iki kısımlı bir dalga fonksiyonuyla başlamıştık:

$$\Psi_{toplam} = |Sol\rangle_{ödül} + |Sağ\rangle_{ödül}$$

Burada, açılı parantezler, ödülün sol ya da sağ kutuda olmasına denk gelen dalga fonksiyonlarını temsil eder. Sonra işe köpek dahil olur:

$$\Psi_{toplam} = |Sol\rangle_{ödül}|Sol\rangle_{köpek} + |Sağ\rangle_{ödül}|Sağ\rangle_{köpek}$$

Sonra da ödülü yiyip yememe kararı:

$$\Psi_{toplam} = |Sol\rangle_{ödül}|Sol\rangle_{köpek}|Yer\rangle + |Sol\rangle_{ödül}|Sol\rangle_{köpek}|Yemez\rangle + |Sağ\rangle_{ödül}|Sağ\rangle_{köpek}|Yer\rangle + |Sağ\rangle_{ödül}|Sağ\rangle_{köpek}|Yemez\rangle$$

Görebileceğiniz gibi, bu iş çok hızla karmaşıklaşıyor; ama gelişimi her zaman Schrödinger denklemiyle betimleniyor.

"Biliyorsun, ben bu denklemlerden pek bir şey anlamıyorum."

"Ayrıntılı olarak anlaman gerekmiyor ki. Dalga fonksiyonunun giderek karmaşıklaşmasını biraz daha somut olarak anlatmak için verilmiş örnekler onlar."

"Yani sadece korkutucu görünmeleri gerekiyor?"

"Fazlasıyla."

"Eh, iyi iş, o halde."



Everett'in çizdiği tablo, hemen bir gelişme gibi görünmez. Gizemli "çöküş" kaldırılmıştır; ama katlanarak büyüyen bir dalga fonksiyonu pahasına. İlk bakışta bu da gerçekliğe aykırıymış gibi görünür; çünkü sistemleri hiç, birden fazla halde görmeyiz. Dalga fonksiyonunun bütün bu fazladan parçaları ortadaysa neden nesneleri aynı anda birden fazla durumdaymışlar gibi algılamıyoruz.

Everett'e göre cevap gözlemciyi dalga fonksiyonundan ayıramayacağımızdır. Gözlemci sistemin geri kalanına dahildir; bileşenler "sol kutudaki ödül ve ödülün sol kutuda olduğunu bilen köpek" gibi şeylerdir; bunun sonucundan da sadece kendi genel dalga fonksiyonumuzun küçük bir kısmını algılarız. Bu dallanma, Einstein ve diğerlerinin çok sıkıntı verici bulduğu kuantum rastgeleliğinin kökenidir: Dalga fonksiyonu her zaman düz ve sürekli bir biçimde evrilir; ama biz bir seferde dalga fonksiyonunun sadece bir dalını deneyimleriz; hangi dalı gördüğümüz de rastgele bir ter-
cihtir. Kendimizin diğer versiyonları, diğer dallarda var olur; fark-
lı sonuçları deneyimler. (Bu yüzden de bu yoruma bazen "çoğul zi-
hinler" yorumu denir.)

Çok sayıdaki diğer dalların hiçbirinin bizim dalımızdaki olay-
lar üzerinde tespit edilebilir bir etkisi yoktur; bizim dalımızın da
başka dallardaki olaylar üzerinde tespit edilebilir bir etkisi yoktur.
Bu diğer dallar, her bakımdan kendi içlerine kapalı, bizim evreni-
mizden hiçbir şekilde erişilemeyecek paralel evrenlerdir. Bu kura-
ma "çoğul dünyalar" yorumu adı verilmesinin kökeninde bu ya-
tar: Sanki her ölçüm yapıldığında evren çatallanır ve sürekli, kü-
çük farklarla değişen tarihleri olan yeni paralel evrenler doğurur.

Dalga Fonksiyonları Düşüyor: Uyum Bozulması

Birbiriyle etkileşimi olmayan bu dallar çoğul dünyalar yorumunun karşısına ciddi, fakat küçük bir problem çıkarırlar. Gördüğümüz iki parçalı dalga fonksiyonlarının hepsi, bir tür girişim fenomenine yol açmıştı. Peki, dalga fonksiyonunun bütün bu fazladan dalları varsa neden etrafımızda her zaman girişim görmüyoruz? Bu "paralel evrenlerin" kapılarını bize kapatan şey ne?

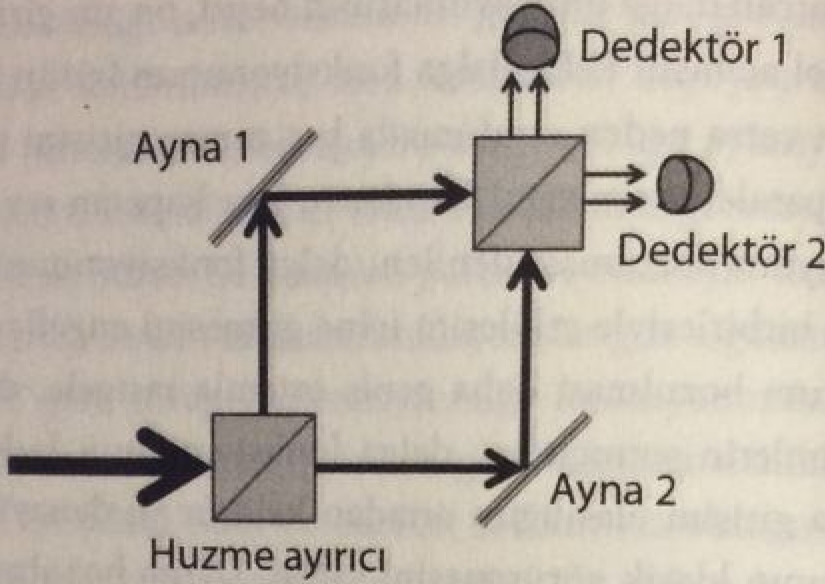
Cevap, uyum bozulması denilen; dalga fonksiyonunun farklı dallarının birbirleriyle etkileşim içine girmesini engelleyen bir süreçtir. Uyum bozulması daha geniş ortamla rastgele, dalgalanan etkileşimlerin sonucudur; dalga fonksiyonunun farklı dalları arasında girişim olasılığını ortadan kaldırır ve deneyimlediğimiz dünyanın klasik görünmesini sağlar. Uyum bozulması sadece kuantum mekaniğinin çoğul dünyalar yorumunda ortaya çıkmış değildir; herhangi bir yorumla uyumlu, gerçek bir fiziksel süreçtir.[1] Fakat uyum bozulması, çoğul dünyalar yorumunun modern kavranışında özellikle önemlidir. (Sonuçta çoğul dünyalar yorumuna bazen "uyumu bozulmuş tarihler" yorumu da denir; yorumun neredeyse evrenler kadar fazla adı vardır.[2])

Uyum bozulması kuantum mekaniği ve kuantum yorumlarının modern kavranışı açısından kesinlikle kritik bir önemdedir. Gelgelelim uyum bozulmasına ilişkin bilinen yarı klasik açıklamaların çoğu, hatalı oldukları ve genellikle de biraz döngüsel oldukları için geride istenen çok şey bırakır. Asıl uyum bozulması

1- Aslında Kopenhag yorumunun yerini almaya aday, ayakta kalabilir kuramların hepsi ölçüm sürecinin önemli bir parçası olarak eşevresizliği içerir.

2- "Çoğul dünyalar", "çoğul tarihler", "çoğul zihinler", "uyumu bozulmuş tarihler", "göreli hal formülasyonu" ve "evrensel dalga fonksiyonu kuramı" bunlardan bazılarıdır.]

kuramı incelikli, anlaması zor bir kuramdır. Gelgelelim, belirsizlik ilkesinde olduğu gibi bu kuramı açmak için biraz çaba sarf etmeye değer; çünkü uyum bozulması evrenin işleyiş biçimine dair çok zengin bir anlayış sunar.



Metinde betimlenen interferometre. Soldan giren ışık huzme ayırıcı tarafından iki ayrı yola ayrılır, sonra ikinci bir huzme ayırıcıyla birleştirilir. Ayna 1'e çarpan huzme Ayna 2'ye çarpan huzmeyle aynı mesafeyi kat ediyorsa girişim bütün ışığın yukarıdaki detektöre (detektör 1) çarpmasına, sağdaki detektöre (detektör 2) hiç ışık çarpmamasına neden olur.

Uyum bozulması fikrini anlayabilmek için basit bir interferometrenin, bir ışık huzmesini ikiye bölen iki huzme ayırıcıdan ve huzmeleri tekrar birleştiren bir çift aynadan oluşan bir aygıtın kullanıldığı somut bir örnek üzerinden gidelim.[3] Bu gibi interferometreler fizikte son derece önemlidir; kuantum etkilerini göstermekle kalmaz, dünyanın en hassas rotasyon, ivme ve kütleçekim detektörlerinin de temelini oluştururlar. Bunlar fizik deney-

---

3- Bu aygıta onu icat eden Alman ve İsviçreli fizikçilerin adıyla "Mach-Zehnder interferometresi" denir.

lerinde minik kuvvetlerin ölçülmesini mümkün kılar; ayrıca denizaltı seyirleri de uygulama alanları arasında yer alır.

Işık huzme ayırıcılardan birine çarptığında interferometreye girer; huzme ayırıcı ışığın yarısını bozmadan geçirir, diğer yarısını ise 90 derecelik bir açıyla yansıtır. Bu iki huzme birbirinden ayrılır, sonra iki ayna kullanılarak yeniden bir araya getirilir ve ikinci bir huzme ayırıcıda yeniden birleştirilir. İkinci huzme ayırıcı öyle yerleştirilmiştir ki ayrılan huzmelerin birinden aktarılan ışık ile diğerinden yansıyan ışık tam olarak aynı yolu izler ve iki detektörden birinin üzerine vurmadan önce birbiriyle girişir.

Bu iki detektörün her birinin, ışığın tam olarak yarısını tespit edeceğini; çünkü her birinin, iki yolun her birinden, ilk huzmenin dörtte birini aldığını düşünebilirsiniz (1/4 + 1/4 = 1/2). Aslında detektörlerin her biri hiç ışık tespit etmeyebileceği gibi, baştaki huzmeyi bütün yoğunluğuyla da tespit edebilir; çünkü farklı yollar izleyen dalgalar, birinci bölümdeki çift yarık deneyindeki dalgalar gibi birbiriyle girişir.

Baştaki huzmenin ikiye ayrılmasıyla oluşan iki huzmenin izlediği yollar tam olarak aynı uzunlukta olursa iki ışık huzmesi Detektör 2'ye giderken aynı sayıda salınımdan geçer ve yapıcı bir biçimde karışarak ortaya parlak bir nokta çıkarır; interferometreye giren ışığın tamamı bu detektöre çarpar.[4] Öte yandan yolların biri diğerinden ışığın dalga boyunun yarısı kadar uzun olursa bu yoldan geçen ışık fazladan yarım bir salınımdan geçecek ve iki dalga yıkıcı bir şekilde karışacaktır: Ayna 1'e çarpan dalga tepeleri Ayna 2'ye çarpan dalga çukurlarıyla birleşecek ve birbirle-

---

4- Bir dalga bir huzme ayırıcıya çarptığında "fazında" küçük bir değişiklik olur; sanki yansımış huzme fazladan küçük bir mesafe almış gibi. Sonuçta iki yol aynı uzunlukta olursa, Detektör 2'ye çarpan dalgalar aynı fazda olur ve birbirine eklenip parlak bir nokta meydana getirir; Detektör 1'e gelen dalgalarsa zıt fazda olur ve birbirini iptal eder. Farklı uzunluktaki yollarda, iki detektör birbirini tamamlayan sinyaller verecektir; biri hiç ışık görmezken, diğeri ilk baştaki huzmenin yoğunluğunu tam olarak tespit eder.

rini iptal edecek, Detektör 2 de hiç ışık vermeyecektir. Uzunluk farkını tam bir dalga boyu artırırsak tepeler yine örtüşür ve parlak bir nokta elde ederiz. Bu iki uç arasında, ara miktarlarda ışık elde ederiz. Bu deneyi birçok kereler tekrarlayarak ve bir yolun uzunluğunu hafifçe değiştirerek bir girişim örüntüsü üretebiliriz. Bu da Detektör 2'de parlak nokta, karanlık, parlak nokta, karanlık diye değişen bir örüntü ortaya çıkaracaktır.

Detektör 2'ye ne miktarda ışık ulaşacağı yalnızca, ışığın iki yolun her birini ne kadar zamanda aşacağına dayanır. Işığın bu iki koldan yol almasını, birbirinin aynı iki köpeğin bir apartman bloğunun etrafında ters yönlerde yürümesine benzetebiliriz. Köpekler en başta aralarında, karşı köşeye ulaşan ilk köpeğin hangi yola gidileceğini seçeceğinde anlaşır. İki köpek aynı hızdaysa ve gittikleri yollar aynı uzunluktaysa, karşı köşeye aynı anda varırlar. Ama yolların biri diğerinden birazcık daha uzunsa o yoldan giden köpek hep daha geç varır ve köpekler bundan sonra, başta anlaştıkları gibi aynı yolu izler.

"Dur bir dakika, kuantum bunun neresinde şimdi? Dalgalardan ve köpeklerden bahsediyorsun sen!"

"İnterferometrenin temel işleyişini klasik olarak anlatabilirsin; ama bir seferde tek bir foton gönderdiğinde de mükemmel işler. Bu sadece kuantum fiziğiyle açıklayabileceğin bir sistem."

"Örüntüyü görmek için çok fazla foton gerekmez mi?"

"Kesinlikle. Ama deneyi birçok kereler tekrarlarsan örüntüyü oluşturursun. Deneyi iki yolun aynı uzunlukta olacağı şekilde kurar da 1000 kere tekrarlarsan detektörlerin birinde 1000 foton görürsün. Sonra aynaların birini bir parça kaydırırsın ve deneyi 1000 kere daha tekrarlarsın, 700 foton görürsün ve böyle devam eder. Bunu tekrar tekrar yaparsan, parlak bir huzmeyle ortaya çıkan örüntünün aynısını görürsün."

"Tıpkı benim her gece arka bahçedeki tavşanı takip etmeye çıktığımda konumunu işaretleyerek dalga fonksiyonunu ölçmem

gibi, ha?"

"Teknik olarak sen olasılık dağılımını, bir dalga fonksiyonunun karesini ölçüyorsun, dalga fonksiyonunun kendisini değil; ama evet, temel fikir bu."

"Tavşan büyük olasılıkla kuş yemliğinin altında oluyor."

"Evet, çünkü dökülmüş yemleri yiyor. Konuya döner misin, lütfen?"

"Peki."

İnterferometrenin kuantum tanımına geçecek, ondan tek tek fotonlar ve dalga fonksiyonları açısından bahsedecek olursak foton dalga fonksiyonunun ilk huzme ayırıcıda iki kısma ayrıldığını söyleriz. Popüler çoğul dünyalar yorumunun penceresinden bakınca dalga fonksiyonunun ikinci dalı ilk ortaya çıktığında evrenin de ikiye ayrıldığını söylemek isteyebilirsiniz.

Bu baştan çıkarıcıdır, ama hatalıdır; çünkü dalga fonksiyonunun iki kolu olsa da o noktada "ayrı evrenler" değillerdir. Bunu biliyoruz; çünkü ikinci huzme ayırıcıda bu kolları bir araya getirdiğimizde girişimi görüyoruz. Bir fotonun detektörümüze ulaşma olasılığı, interferometredeki yollardan birinin uzunluğunu değiştirdiğimizde değişiyor; bu da iki ayrı yolun birbirini etkilediğini gösteriyor. Foton aynı anda iki yoldan birden gidiyor ve kolları yeniden birleştirdiğimizde kendisiyle girişiyor.

Bu girişim örüntüsünü görüyoruz; çünkü dalga fonksiyonunun iki kısmı "eşevrelilik" (coherence/ eşfazlılık) dediğimiz bir özelliğe sahip. "Eşevrelilik" kaygan bir kelimedir; ama iki dalga fonksiyonunun "eşevreli" olduğunu söylediğimizde tek bir kaynaktan geliyormuş gibi davrandıklarını anlatmak isteriz.[5] İnterferometre örneğinde tek bir kaynaktan gelirler; huzme parçaları-

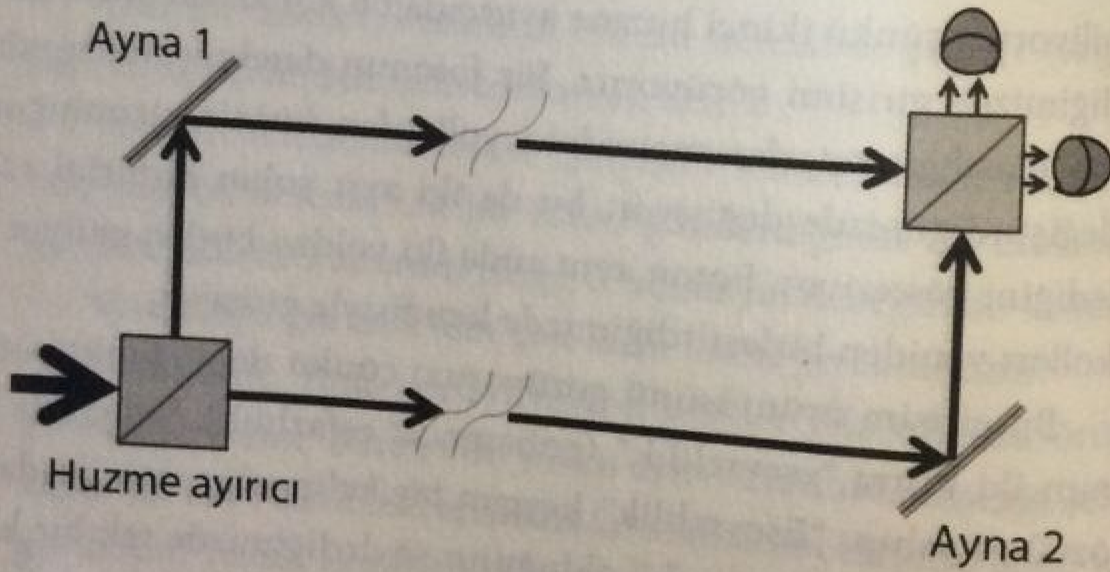
---

5- Bu çok kaba bir tanımdır ve her şeyi yakalamaz; örneğin tek bir büyük kaynağın iki karşıt ucundan çıkan dalgalar eşevreli olmayabilir; ama yine de bu tanım ana fikri aktarır.

nın her biri interferometreden geçerken, esasen aynı etkileşimleri geçirir; böylece bütün yol boyunca eşevreli kalırlar. Girişimin eş fazlı ya da zıt fazlı olduğunu belirleyen tek şey, iki yolun uzunluğudur.

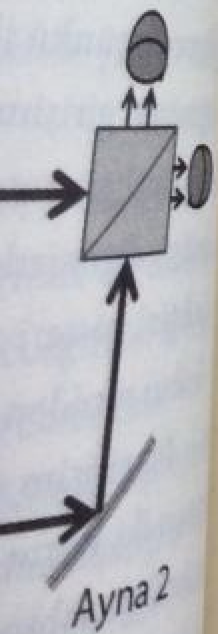
Dalga fonksiyonunun iki kolunu, iki ayrı evren haline getirmek için bu eş fazlılığı ortadan kaldırmamız gerekir. Eşevrelilik olmazsa dalga fonksiyonunun iki parçası birbiriyle karışarak tespit edilebilir bir örüntü ortaya çıkarmaz; bir yolun diğeri üzerindeki etkisini göremeyiz. Foton iki farklı evrende klasik bir parçacık olarak görünecektir; bir evrendeki huzme ayırıcıdan doğruca geçecek, diğerinde yansıyacaktır.

Dalga fonksiyonunun iki kolu arasındaki eşevrelilik, daha büyük bir ortamla etkileşim yoluyla ortadan kalkar. Bunun nasıl işlediğini görmek için interferometreyi çok uzun yaptığımızı düşünelim; öyle ki huzmelerin iki huzme ayırıcı arasında, havanın içinden çok yol geçmesi gereksin:



Huzme ayırıcılar arasında çok uzun bir mesafenin bulunduğu bir interferometre.

Yürüyüşe çıkan köpek örneğinde, bu uzun interferometreyi,



birbirinin aynı iki köpeği ters yönlerde Central Park etrafında yürümeye göndermişiz gibi düşünebiliriz. Yolun daha uzun olması, dikkat dağıtan şeylerin de fazlalaşması anlamına gelir: peşinden koşacak sincaplar, yere düşmüş yiyecekler, basılacak at pislikleri. Artık köpekler aynı hızda yol alamaz; karşılarına çıkan şeye bağlı olarak bazen hızlanırlar, bazen yavaşlarlar. İki köpeğin varış noktasına hangi sırayla geleceği, sadece izledikleri yolun uzunluğuna değil, yolda nelerle karşılaştıklarına da bağlıdır.

Aynı şey ışık açısından da geçerlidir. Işık interferometrede yol alırken havayı oluşturan atomlar ve moleküllerle zaman zaman etkileşime geçer. Bir koldan ilerleyen ışık ortalamadan daha fazla molekülün bulunduğu bir bölgeden geçip yavaşlayabilir ya da molekül sayısının ortalamadan çok daha az olduğu bir bölgeden geçip biraz hızlanabilir. Bu etkiler çok küçüktür, ama yolun uzunluğuna eklenir; tıpkı yürüyüşe çıkan köpeklerin karşılarına çıkan dikkat çekici şeyler gibi. Girişim örüntüsü artık yalnızca iki yolun uzunluğuyla değil, ışık huzmelerinin içinden geçtikleri ortamla, yani havayla etkileşimleriyle de belirlenir.

Ortamla etkileşimler, Central Park çevresindeki dikkat çekici şeyler gibi, temelde rastgeledir ve değişkendir; başka bir deyişle bir yerden diğerine, bir andan diğerine farklılık gösterirler. Bir köpek her gün aynı kaldırımda yere düşürülmüş bir yiyecek bulmayacaktır; bir foton da interferometrenin aynı kısmında her seferinde bir molekülle etkileşime girmeyecektir. Etkileşimler örüntüyü değiştirir ve bu değişiklik de deneyi yaptığımız her seferinde farklı olur. Sonuç; Detektör 2'de ışık görüp görmeyeceğimiz ya da hangi köpeğin yarışı kazanacağı, tümüyle rastgeledir, kontrolümüz dışındaki etkenlerle belirlenir.

Bu rastgele etkileşimler sayesinde, iki koldaki ışık dalgaları artık eşevreli olmaz; bu yüzden de onları bir araya getirdiğimizde artık açık bir etkileşim örüntüsü görmeyiz. Onun yerine sürekli değişen, saniyede milyonlarca kere konumu farklılaşan bir örün-

tü görürüz. Parlak ve karanlık noktalar iç içe geçip bulanıklaşır ve örüntüyü siler. Aynı etki, deneyi tek tek fotonlarla yaptığımızda da ortaya çıkar; dalga fonksiyonunun iki parçası artık eşevreli değildir. Fotonlar geniş bir ortamla rastgele, değişen etkileşimlerden geçtiğinde girişim örüntüsü zarar görür.

Kuantum etkilerini ortadan kaldıran bu rastgele etkileşimlerin gerçekleştiği süreç uyum bozulması (decoherence) olarak bilinir; çünkü foton dalga fonksiyonunun farklı kısımları arasındaki eşevreliliği (coherence) ortadan kaldırır. Uyum bozulması dalga fonksiyonunun farklı kollarının birbirini tespit edilebilir bir biçimde etkilemesini engeller; farklı kolların bir araya gelip de girişim örüntüleri yaratmasını beklesek de bunu görmeyiz. Uyum bozulması yüzünden farklı kollar arasındaki girişim rastgeledir ve bu yüzden de tespit edilemez.

"Yani elimizde birbiriyle girişmeyen iki farklı foton var, ha?"

"Hayır, bundan daha ince bir durum var. Elimizde hâlâ bir foton var; ama dalga fonksiyonunun iki farklı kolunda beliriyor. Uyum bozulması yüzünden bir girişim göremiyoruz."

"Kendisiyle girişmeyen tek bir foton, öyle mi?"

"Kendisiyle girişir; ama ortamla etkileşimi girişim örüntüsünü her seferinde farklılaştıran rastgele değişimlere yol açar. Tekrarlanan ölçümlerle bir örüntü ortaya çıkaramayız; çünkü örüntü her seferinde değişir. Örüntü saniyede milyonlarca kere değişir; büyük olasılıkla parlak bir noktayı karanlık nokta olarak alırsınız, bu da her şeyi bulaştırıp bir..."

"Bir karanlık-parlak arası noktaya mı çevirir?"

"Aynen."

"Kovalamaya çıktığımda tavşanın dalga fonksiyonunu ölçmeye çalışmam, ama bazen tavşan yerine sincapları takip etmiş olmam gibi, ha?"

"Bak, sincaplar da tavşanlar da genellikle kuş yemliğinin altında oluyor; bu yüzden pek fark etmezdi. Daha çok şuna benzi-

yor: Sen her gece tavşanın konumunu kaydedip dalga fonksiyonunu ölçmeye çalışıyorsun; ama ben kuş yemliğini bahçede farklı yerlere taşıyorum."

"Ah. Buna kıllık derler. Sakın yapma."

"Yapmayacağım. Sadece uyum bozulmasının girişim örüntüsünü nasıl sildiğini anlatmak için benzetme yapıyorum. Tek tek fotonların her biri kendisiyle karışsa da dalga fonksiyonunun iki kısmı eşevreli değildir; bu yüzden de tekrarlanan ölçümlerle bir örüntü ortaya çıkaramayız."

"Ama bir örüntü görmüyorsak girişim olduğunu nasıl bilebiliriz? Bir girişim örüntüsü üretmeyen kuantum parçacıklarıyla sıradan klasik parçacıklar arasındaki fark nedir?"

"Mesele de bu işte: Hiçbir fark yok. Rastgele etkileşimler yüzünden, kuantum etkileri sıvaşır ve elimizde girişim örüntüsüne benzemeyen bir şey geçer; girişim her zaman olsa dahi. O zamanın yüzde 50'sinde, bir foton tespit edersin; tıpkı hiç dalga özelliği göstermeyen klasik bir parçacıkmış gibi."

"Bilmiyorum. Biraz Zenvari değil mi? 'Karışan bir fotonun örüntüsü nedir?'"

"Hey, bu çok iyi."

"Teşekkürler, tabiatımda Buda olmak da vardır, bilirsin."

Ortamın Etkisi: Uyum Bozulması ve Ölçüm

Bazen, uyum bozulmasını bir ölçüm süreciymiş gibi anlatan açıklamalarla karşılaşırsınız; "Bir foton bir hava molekülüyle etkileşim içine girdiğinde, bu, fotonun konumunu ölçmekle aynı şeydir; ölçüm girişim örüntüsünü ortadan kaldırır," gibi şeyler söylenir. Bu gibi açıklamalar neredeyse tam anlamıyla geri açıklamalardır; uyum bozulması, fotonu etkileşimleri sırasında ölçmenin

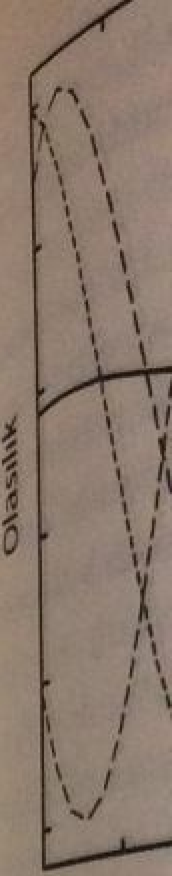
bir sonucu değildir; foton ile çevresi arasındaki etkileşimi *ölçmemenin* bir sonucudur.

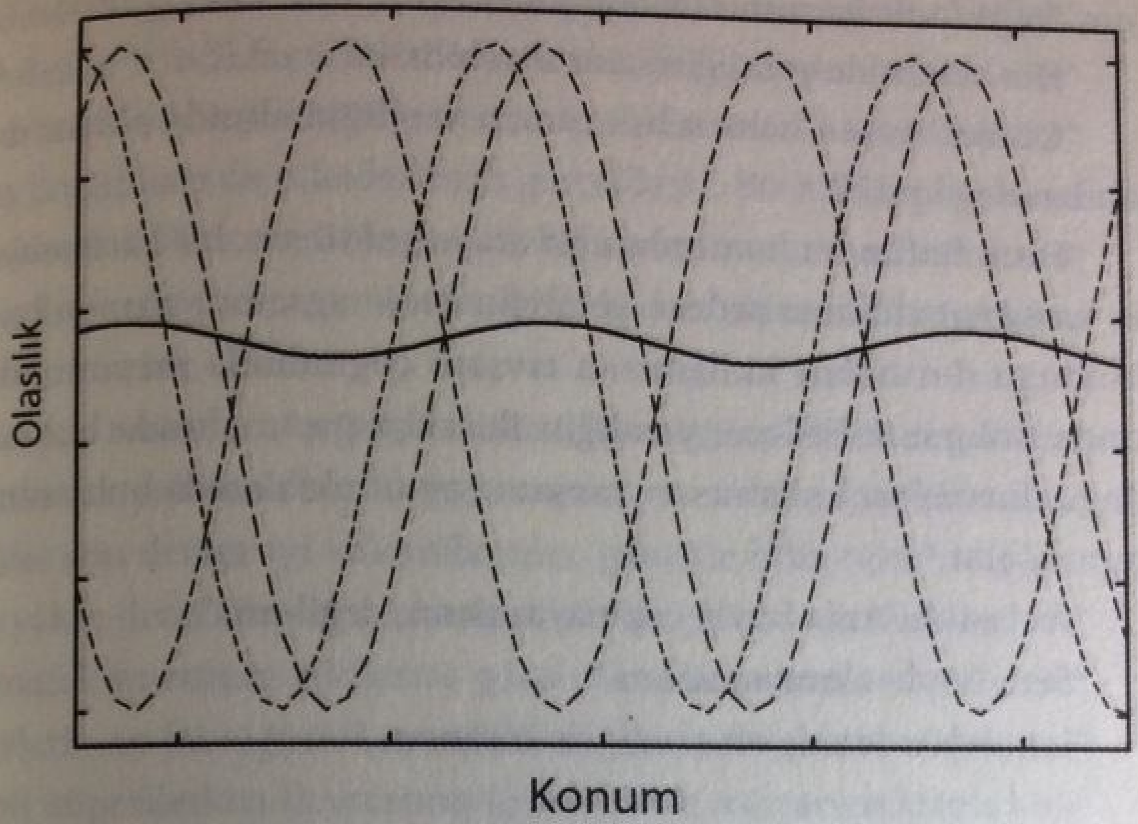
Bu incelikli bir noktadır; ama uyum bozulmasıyla ilgili modern kavrayışlar açısından kilit önemdedir. İnterferometreye tek tek fotonlar gönderdiğimizde fotonların her biri kendisiyle girişir; bu girişim örüntüsünün bir dalga fonksiyonu vardır. Binlerce foton gönderirsek her seferinde aynı etkileşim olursa, ölçümü tekrar tekrar gerçekleştirip karşı sayfadaki şekilde gösterilen kesintili çizgili ilk eğriye benzer bir girişim örüntüsü çıkarabiliriz.

Fakat her seferinde foton ile çevresi arasında aynı etkileşimi garanti edemeyiz; tıpkı Central Park'taki bir turistin, köpeklerimiz her yürüyüşe çıktığında aynı noktaya yiyecek düşüreceğini garanti edemeyeceğimiz gibi. Sonuçta, gönderilen ikinci foton, farklı bir dalga fonksiyonuna göre kendisiyle girişecektir. *Bu* deneyi binlerce kez tekrarlayabilirsek şekildeki kesintili çizgili ikinci eğriye benzer bir örüntünün izini sürebiliriz. Üçüncü fotonun başka bir dalga fonksiyonu vardır, onun örüntüsü de üçüncü eğri gibi olur vs.

Sonunda bu örüntülerin ve binlerce başka örüntünün her birinde, her biri farklı konumlarda zirve yapan tek bir foton görürüz. Toplam etki, birçok farklı girişim örüntüsünün toplamı olan bir örüntünün izini sürerek bulunur. Bu da şekilde kesintisiz bir çizgiyle gösterilmiştir; neredeyse hiç girişim olmadığını gösterir.

Bunun ortamı, çevreyi ölçmekle ne ilgisi vardır? Gönderdiğimiz fotonların her biri havayla etkileşim kurduğunda, ortamın durumunda küçük bir değişikliğe yol açar; bir hava molekülü biraz daha hızlanır ya da yavaşlar ya da molekülün iç hali bir şekilde değişir. Ortama, çevreye tam olarak ne olduğu tam olarak ne tür bir etkileşimin gerçekleştiğine bağlıdır; bu da fotona ne olduğunu belirler.





Kesintili çizgiler üç farklı fazdaki fotonların girişim örüntülerini gösterir. Kesintisiz çizgi, böyle birkaç örüntünün toplamını temsil eder; girişim örüntüsünün neredeyse tamamen silindiğini gösterir.

Ortama olan her şeyin, interferometredeki iki yolda bulunan bütün hava moleküllerinin tam olarak durumlarını belirleyebilseydik bu bilgiyi fotona ne olduğunu incelemek için kullanabilir; dalga fonksiyonları aynı örüntüleri üreten fotonlara bakmayı seçebilirdik. Çok çok az sayıda foton tam olarak aynı sonucu verecektir; ama bu deneyi yeterince tekrarlarsanız bazılarının aynı sonucu verdiğini görebilirsiniz; aygıttan geçen 159. foton ilk fotonla tam olarak aynı örüntüyü üretebilir, sonra 1022'inci, ondan sonra 5674'üncü ve böyle devam eder. Sadece bu fotonlara bakarsanız sanki hiç uyum bozulması yokmuş gibi bir girişim örüntüsü çıkardıklarını görebilirsiniz.

"Yani, sen her gece yemliğin yerini değiştirsen de benim tavşa-

nın dalga fonksiyonunu çıkarabilmem gibi, öyle mi?"

"Her seferinde yemliğin izini sürebilirsen, evet."

"Çünkü tavşan hemen her zaman yemliğin altında oluyor da ondan değil mi?"

"Evet. Bütün bu konumları bir araya getirirsen, bir karmaşayla karşılaşırsın; ama sadece yemliğin meşe ağacının altında bulunduğu durumları kullanırsan tavşanı çoğunlukla meşenin altında bulursun. Sadece, yemliğin iki akçaağacın altında bulunduğu durumları kullanırsan, tavşanı çoğunlukla orada bulursun, bunun gibi."

"Anlaşıldı. Ama böyle yapmayacaksın, değil mi?"

"Seni böyle üzmem canım."

"İşte o yüzden de en sevdiğim insansın."

Bu durumda, çoğul dünyalar tablosunun Kopenhag yorumunun ortaya çıkardığı büyük problemlerin ikisini de ortadan kaldırdığını görüyoruz. Dalga fonksiyonunun gizemli "çöküşü"nü ortadan kaldırmakla kalmıyor; Kopenhag yorumunun mikroskobik ile makroskobik arasında yaptığı keyfi ayrımı da ortadan kaldırıyor. Çoğul dünyalar yorumuna göre, kutulardaki kediler gibi makroskobik nesneler *de* kuantum kurallarına *uyar*, süperpozisyon ve girişim etkileri gösterir. Biz bu etkileri, çevreyle, ortamla etkileşimin sebep olduğu uyum bozulması yüzünden *görmeyiz*. Ama kedi ile ortamı arasındaki bütün etkileşimlerin izini sürebilseydik dalga fonksiyonunu yeniden kurabilir, her ölçekte kuantum mekaniğinin işlediğini doğrulayabilirdik.

Elbette, bırakın bir parça biftek ya da aç bir köpek gibi makroskobik nesneleri oluşturan parçacıkları, en basit bilimsel deneylerdeki bütün parçacıkların tam olarak durumlarının izini bile sürmek imkânsızdır. Sonuçta uyum bozulması süreci her zaman gerçekleşir ve son derece hızlı gerçekleşir. Bir nesnenin daha büyük bir ortamla etkileşim içinde olduğu her seferinde uyum

bozulmasını görürsünüz; bütün nesneler her zaman ortamlarıyla etkileşim içindedir. Elinizde ne kadar fazla atom olursa, sistemin ortamla etkileşim içinde olma olasılıkları da o kadar fazladır; uyum bozulması da o kadar hızlı gerçekleşir. Bir biftek parçasında yaklaşık 10^{23} atom bulunur; dolayısıyla uyum bozulması son derece hızlı gerçekleşir; o kadar hızlı ki kuantum etkilerini görme şansımız hiç olmaz.[6]

Gerçek nesneleri, ortamlarından, kuantum girişimini görebilecek kadar yalıtmak son derece zordur, ama bu yapılabilir. Deneyciler son derece iyi vakumlanmış, genelde bileşenleri mutlak sıfıra yakın derecede soğutulmuş odalarda çok az sayıda parçacık kullanarak kuantum etkilerini göstermeyi başarmışlardır. Bu tür deneylerin en büyüğünde, mutlak sıfırdan birkaç derece daha sıcak bir süperiletken devresinin içindeki bir milyar elektron kullanılmıştı. Elektronlar, devrenin etrafında saat yönünde ve saat yönünün tersinde akışa denk gelen hallerin süperpozisyonunda bulunuyordu (bir köpeğin Central Park'ın etrafında aynı anda hem saat yönüne hem tersine yürümesi gibi). Bir milyar elektron kulağa çok gibi geliyor; ama gündelik nesnelerle karşılaştırıldığında hâlâ çok küçüktür. Fakat bu elektronlar, ortam yeterince titiz kontrol edildiğinde, çok sayıda parçacıkla kuantum davranışlarını görebileceğimizi göstermeye yarar.

6- Bu durum, birinci bölümde gördüğümüz üzere 10 gramlık bir parça bifteğin dalga boyunun 10^{-29} metre olmasının üzerine tüy diker. Dalga boyunun bu uzunluğu eşevresizlik söz konusu olmasaydı da bifteğin girişim örüntüsünü ölçmemizi neredeyse imkânsız kılardı.

Gerçekliğe Çıkmak: Uyum Bozulması ve Yorumları

Uyum bozulması fikri hiçbir şekilde, kuantum mekaniğinin çoğul dünyalar yorumuna özgü değildir. Uyum bozulması bütün yorumlarda olan gerçek bir fiziksel süreçtir. Kopenhag yorumunda, ölçüm sürecinin ilk adımı olarak ortaya çıkar; sonunda varılabilecek halleri belirler. Uyum bozulması, iki ya da daha fazla halin eşevreli süperpozisyonunu (hem A hem B), belli durumların uyumu bozulmuş girişimine çevirir (ya A ya B). Sonra bilinmeyen başka bir mekanizma dalga fonksiyonunun bu hallerden birine çökmesine ve ölçüm sonucunu vermesine yol açar. Çoğul dünyalar yorumunda uyum bozulması, dalga fonksiyonunun farklı kollarının etkileşim içine girmesini engelleyen şeydir; her dalda sadece o dalı algılayan bir gözlemci vardır.

Her iki durumda da uyum bozulması kuantum süperpozisyonlarından klasik gerçekliğe çıkma yolunda temel bir adımdır. Kuantum kuramının bütün somut öngörüleri, yorum ne olursa olsun, mutlak bir benzerlik gösterir. Hangi yorumu beğenirseniz beğenin, dalga fonksiyonunu bulmak için aynı denklemleri kullanırsınız ve dalga fonksiyonu da size bir ölçümdeki farklı olası sonuçların olasılıklarını verir. Bilinen hiçbir deney Kopenhag yorumu ile çoğul dünyalar yorumu arasında ayrım yapmayacaktır,[7] bu yüzden hangisini kullandığınız aslında bir zevk meselesidir. Bu yorumlar sadece, dalga fonksiyonunun öngördüğü olasılıklardan fiili bir ölçüm sonucuna doğru ilerlediğinizde neler olduğunu düşünmenin farklı biçimleridir.

7- Başka yorumlar arasında da ayrım yapmayacaktır. Kuantum mekaniğinin yorumları, bir deneyin sonuçlarıyla ilgili farklı bir sözlükçe veren bir tür "metakuram" gibidir; ama deney sonuçlarını değiştirmezler. Her an şu ya da bu yorumu deneysel olarak "kanıtladığını" iddia eden biriyle karşılaşabilirsiniz; ama onların kafası kaçınılmaz olarak karışıktır.

"E peki ben evrenimi nasıl seçeceğim?"

"Anlamadım."

"Ben biftek yediğim evrende olmak istiyorum. Hangi evrende olacağımı belirleyen şey ne? İstediğimi elde etmek için bunu nasıl değiştiririm?"

"Hmm. Bir kuantum ölçümünün sonucunu etkilemek için yapabileceğin bir şey yok, bildiğimiz kadarıyla. Tümüyle rastgele; bunu ister bir dalga fonksiyonunun çökmesi olarak düşün ister evrenin bütün dalga fonksiyonunun tek bir dalını algılamak olarak düşün. Hangisi olursa olsun rastgele sonuçlara bağlısın."

"Ama çok dünyalı yorumda dalga fonksiyonunun her zaman Schrödinger denklemine uygun olduğunu söylemiştin? Hangi dalın gerçek olduğunu belirlemek için bunu kullanamaz mısın?"

"Farklı dallardaki olasılıkları öngörmek için bunu kullanabilirsin; ama her dalda senin, kendi ölçüm sonuçlarını algılayan bir versiyonun olacak. Bunların her biri de kendilerinin "gerçek" dalda olduğunu düşünecek ve neden farklı bir dalda olmadıklarını soracak. Kuram birinden birinin 'gerçek' olmasıyla ilgili bir şey söylemiyor."

"Yani bu... Bu aslında çelme."

"Üzgünüm ama öyle. Matematiksel olarak daha zarif; ama dibine baktığında Kopenhag yorumundan daha tatmin edici değil. Soruyu bir düzey daha geri itmek gibi bir şey."

"Yorumlar aptalca."

"Bu düşüncende yalnız değilsin, ama şimdilik bunlara bağlıyız."

"Ben sevmedim. Biftek yemek istiyorum. Kuantum ölçümü biftek yememi sağlamayacaksa daha fazla uğraşmak istemiyorum."

"Yorumlar hiçbir şekilde kuantum kuramının tamamı değil. Zamanlarını bu meselelere harcayan pek az insan var. Fizikçilerin çoğu yorumlar üzerinde durmaz, kuantum mekaniğini yarar-

lı işler için kullanmaya bakar."

"Ölçüm rastgeleyse nasıl olur da onunla yararlı bir iş yapabilirsin ki?"

"Gelecek bölümde görürsün."

V

Daha Gelmedik mi? Kuantum Zeno Etkisi



Iş yerinde uzun, sinir bozucu bir gün geçirmiştim; günüm bir komisyon toplantısından öbürüne koşmakla geçmişti; eve geldiğimde başım zonkluyordu. Kate eve gelene kadar yaklaşık bir saatim vardı, tek istediğim biraz kestirmekti. Emmy beni görünce kendinden geçti; mutluluktan oturma odasının her tarafında dans etti.

"Yaşasın! Evdesin! Oleeey!" Kuyruğunu o kadar sert sallıyordu ki neredeyse dengesini kaybedecekti. Her öğleden sonra eve geldiğimde böyle oluyor.

"Seni görmek de güzel."

"Hadi eğlenceli bir şeyler yapalım! Hadi atmaca-kapmaca oynayalım! Hadi yürüyüşe çıkalım! Hadi yürüyüşe çıkıp atmaca kapmaca oynayalım!"

"Hadi ben biraz kestireyim." Zıplamayı hemen kesiyor, başı öne eğiliyor. Kulaklarını, kuyruğunu sarkıtıyor."

"Yürüyüşe çıkmak yok mu?"

"Hayır, şimdi değil," diyorum, kanepeye uzanarak. "Ben yarım saat kestireyim, sonra eğlenceli bir şeyler yaparız."

"Söz mü?"

"Söz. Şimdi sessiz ol. Ne kadar çabuk uyursam, o kadar çabuk eğlenceli bir şeyler yaparız."

"Ha, peki."

Uzanıyorum, kanepeye rahatça yerleşiyorum. Tam içim geçip uykuya dalacakken, soğuk, ıslak bir burnun yüzümü dürttüğünü hissediyorum.

"Uyuyor musun?"

"Hayır. Uyumuyorum."

"Haa." Bir dakika geçiyor.

Dürtüyor. "Uyuyor musun?"

"Hayır." Bir dakika daha geçiyor.

Dürtüyor. "Uyuyor musun?"

"Hayır!" Kalkıp oturuyorum. "Bak burnunla dürtükleyip şu soruyu sormayı bırakmazsan hiç uyuyamayacağım."

"Neden?"

"Beni her dürttüğünde, uyandırıyorsun ve yeniden başlamam gerekiyor. Uyandırıp durursan tam olarak uyuyamam ve sen de eğlenceli bir şeyler göremezsin."

"Haa." Yüzü parlıyor. "Hey, bu tıpkı *Zero Effect* (Sıfır Etkisi) gibi!"

"Ne etkisi?"

"Bilirsin canım. Hani kaplumbağayı yakalayamayan adam var ya, onun gibi, hani yolun yarısını gitmesi gerekiyor, sonra diğer yarısını, hiç ulaşamıyor ya?"

"Zeno paradoksu demek istiyorsun. Zeno, "n"yle. Senin dediğin *Zero Effect* Bill Pullman ve Ben Stiller'ın oynadığı bir film."

"Neyse ne, telaffuzum o kadar iyi değil."

"Neyse, düşündüğün şey kuantum Zeno etkisi. Evet, bu biraz onun gibi. Bir durumdan diğerine geçen bir sistem varsa, ikinci durumda olma olasılığı zamanla artıyorsa tekrarlanan ölçümlerle hal değişikliğini önleyebilirsin. Birinci durumda olup olmadığını ölçtüğün her seferinde süreci yeniden başlatmış olursun."

"Doğru. O zaman, sana uyanık olup olmadığını sorduğumda, dalga fonksiyonunu 'uyanık' haline çökertmiş oluyorum ve senin de yeniden uyumaya başlaman gerekiyor."

"Ya da çoğul dünyalar tablosuna göre, kendini benim uyanık olduğum dalga fonksiyonunu algılarken buluyorsun. Ama evet, ana fikir bu, iyi benzetme."

"Ben filozof bir köpeğim."

"Evet, çok akıllısın. Şimdi sus da biraz uyuyayım."

"Peki. Uyuyor musun diye bir daha sormayacağım."

"Teşekkür ederim."

Yeniden kanepeye yerleşiyorum, içim ısınıyor, tam dalacakken...

Dürtüyor. "Uyanık mısın?"

İster Kopenhag yorumunu ister çoğul dünyalar yorumunu tercih edin, bir ölçüm yaptığınızda *bir şey* olur. İster bir dalga fonksiyonunu fiziksel olarak çökerttiğini düşünün, ister algınızı genişleyen ve gelişen bir dalga fonksiyonunun tek bir dalıyla sınırladığını düşünün, ölçüm etkin bir süreçtir. Siz bir nesnenin durumunu ölçmeden önce, nesne olası bütün durumların kuantum süperpozisyonundadır; ölçümden hemen sonraysa sadece ve sadece bir durum gözlersiniz.

Bu bölümde etkin ölçümün en önemli sonucuna, "kuantum Zeno etkisi"ne bakacağız. Bir kuantum parçacığını tekrar tekrar ölçmenin, onun halini değiştirmesini engellediğini göreceğiz. Kuantum Zeno etkisini, nesnelerin varlığını onlara tek bir ışık fotonuyla bile vurmadan tespit etmek için de kullanabiliriz.

Buradan Hiçbir Yere Gidemezsin: Zeno Paradoksu

Bu etkinin isminde, MÖ beşinci yüzyılda yaşamış Yunan filozof Elealı Zeno'nun meşhur paradokslarına bir gönderme vardır. Bu paradoksların birkaç farklı versiyonu vardır; ama hepsinin de amacı hareketin imkânsız olduğunu göstermektir.

İşte size bu argümanın modern köpeksi bir versiyonu: Odanın öbür ucunda duran bir ödüle ulaşabilmek için bir köpeğin önce odanın yarısını aşması gerekir, bu sonlu bir zaman alır. Sonra geri kalan mesafenin yarısını aşması gerekir, bu da sonlu bir zaman alır; sonra geri kalan kısmın yarısını vs. Odanın bir ucundan diğerine olan mesafe sonsuz sayıda yarıya bölünmüştür, bunların hepsini de aşmak sonlu bir zaman alır. Her biri sonlu bir zaman süren sonsuz sayıda yarıyı birbirine eklerseniz odanın bir ucundan diğerine gitmek sonsuz zaman alacaktır. Dolayısıyla zavallı köpeğin lezzetli ödülüne ulaşması imkânsızdır.

Her yerdeki aç köpekleri mutlu edecek bir haberim var: Bu açık paradoksun bir çözümü vardır. Mesafe küçülürken, onu aşmak için gereken zaman da azalır. Odanın yarısı bir saniyede aşılıyorsa sonraki yarı çeyrek yarım saniyede, ondan sonraki sekizde bir çeyrek saniyede aşılacaktır ve bu şekilde devam edecektir. Bütün bu süreleri birbirine eklersek şunu buluruz:

$$1s + 1/2s + 1/4s + 1/8s... = 2s$$

Toplam süre, sonsuz sayıda terimin toplamıdır; ama siz ilerledikçe terimler küçülür. On yedinci ve on sekizinci yüzyılda integral ve diferansiyel hesabının icat edilmesiyle matematikçiler bu tür dizileri nasıl toplayacaklarını öğrendiler. Sonsuz toplam sonlu bir sonuç verir: Köpek odanın bir ucundan diğerine iki saniyede gider. Nihayetinde hareket mümkündür ve iyi bir köpek ödüllerine her zaman ulaşabilir.[1]

1- Sonsuz dizilerin toplanması fizikçiler, mühendisler ve çoğu

Seyredilen Kazanlar ve Ölçülen Atomlar: Kuantum Zeno Etkisi

Kuantum Zeno etkisi, bir kuantum nesnesinin, örneğin bir atomun bir durumdan diğerine geçmesini engellemek için tekrar tekrar yapılan ölçümler yoluyla, kuantum ölçümünün etkin niteliğinden yararlanır. Atomu, geçiş sürecinin başlamasından çok kısa bir süre sonra ölçecek olursak çok büyük olasılıkla ilk durumda bulunacaktır. Atomu ölçme eylemi, üçüncü bölümde gördüğümüz üzere onu ilk hale geri gönderir ve geçiş süreci yeniden başlar.

Atomun halini ölçmeyi sürdürürsek onu başladığımız yere geri döndürmeyi sürdürürüz. Atom Zeno paradoksunu andıran bir belaya girer: Aynı hedefe doğru sonsuz sayıda adım atıp asla oraya ulaşamamak.[2] Eski bir atasözünde dendiği gibi seyredilen kazan kaynamaz; en azından bir kuantum kazanıysa.

Bu durum klasik fizikle ciddi bir farklılık gösterir. Klasik bir nesnenin halini ölçmek halini değiştirmez; bir kazan su, ölçüm yapıldığında yarı yarıya kaynama noktasındaysa, ölçüm yapıldıktan sonra da yarı yarıya kaynama noktasında olur. Kuantum Zeno etkisi, sadece kuantum ölçümünün etkin niteliği yüzünden işler; bir kuantum kazanındaki su ya kaynıyordur ya kaynamıyordur. Kaynamadığını görürseniz, hiç ısıtmamışsınız gibi yeniden başlamanız gerekir.

---

için Zeno paradoksunun çözümü olarak kabul edilse de bazı filozoflar bunu Zeno paradoksunun yeterli bir çözümü olarak görmez. (*Stanford Encyclopedia of Philosophy*). Bu sadece filozofların matematikçilerden, hatta kedilerden bile çılgın olduğunu gösterir.

2- Yunan edebiyatından daha iyi bir benzetme Sisifos efsanesi olabilir; Sisifos, ebediyen bir kayayı bir tepeye çıkarma, kayanın aşağıya düşmesi sonrasında tekrar yukarıya çıkarma cezasına çarptırılmıştır. Ama "Sisifos etkisi" başka bir şey için kullanıldığından, buna kuantum Zeno etkisi denmiştir.

Belirleyici bir nitelik taşıyan kuantum Zeno etkisi deneyi, 1990'da Colarado NIST'te Dave Wineland'in grubunda yer alan Wayne Itano tarafından berilyum iyonları kullanılarak gerçekleştirildi. İyonlar bir tek elektronu alınmış atomlardır ve bütün atomlar gibi onlar için de bir izinli durumlar dizisi vardır; ışık soğurarak ya da salarak bu durumlar arasında gidip gelirler. Itano'nun deneyinde birkaç bin berilyum atomu toplanmış ve mikrodalgaya tabi tutularak bir durumdan diğerine yavaşça geçmeleri sağlanmıştı.

Ölçülmediklerinde, iyonların birinci durumdan ikinci duruma geçmeleri 256 milisaniye sürmüştü.[3] Bu süreçteyken durumları, atomu birinci halde ve ikinci durumda bulmaya denk gelen iki kısımdan oluşan bir dalga fonksiyonuyla betimleniyordu. Deneyin başında atomlar yüzde 100 birinci, sonundaysa yüzde 100 ikinci durumdaydılar. Arada, ikinci durumun olasılığı sürekli artmış, birinci durumun olasılığı sürekli azalmıştı.

Deneyi yapanlar iyonların durumunu, frekansı, birinci durumdaki iyonların ışık soğuracağı, ikinci durumdaki iyonların hiç ışık soğurmayacağı şekilde ayarlanmış bir ultraviyole lazeriyle ölçmüşlerdi. Birinci durumdaki iyonlar lazerden gelen fotonları soğuruyor ve birkaç nanosaniye sonra bunları salıyor, iyonlara doğrultulmuş bir kameranın üstünde parlak bir nokta oluşmasına neden oluyorlardı. İkinci durumdaki iyonlarsa lazerle aydınlatıldıklarında hiç ışık üretmiyorlardı. Bu durumda kameraya ulaşan ışığın toplam miktarı, birinci durumdaki atomların sayısının doğrudan ölçümü oluyordu.

NIST grubu, kuantum Zeno etkisini göstermek için hepsi de birinci durumda bulunan çok sayıda iyonu kıstırdı. Deneyciler sonra mikrodalgaları açtılar; 256 milisaniye beklediler ve lazeri

3- Bir saniyenin çeyreği insanlar ya da köpeklere çok hızlı gelir; ama aslında bir atom için yavaştır. Atomlar genellikle saniyenin birkaç milyarda birinde durum değiştirir.

açtılar. İyonların hiçbiri ışık üretmedi; bu, örneklem grubunun yüzde 100'ünün beklendiği üzere ikinci duruma geçtiğini gösteriyordu. Sonra deneyi iki lazer vuruşuyla tekrarladılar: Lazer vuruşlarından biri 128 milisaniye sonra (ikinci hale geçişin ortasında), diğeri de 256 milisaniye sonra gerçekleştirildi. Bu durumda, 256 milisaniye sonra, ışığın ancak yarısını görebildiler; bu da iyon grubunun ancak yarısının ikinci duruma geçebildiğini gösteriyordu.

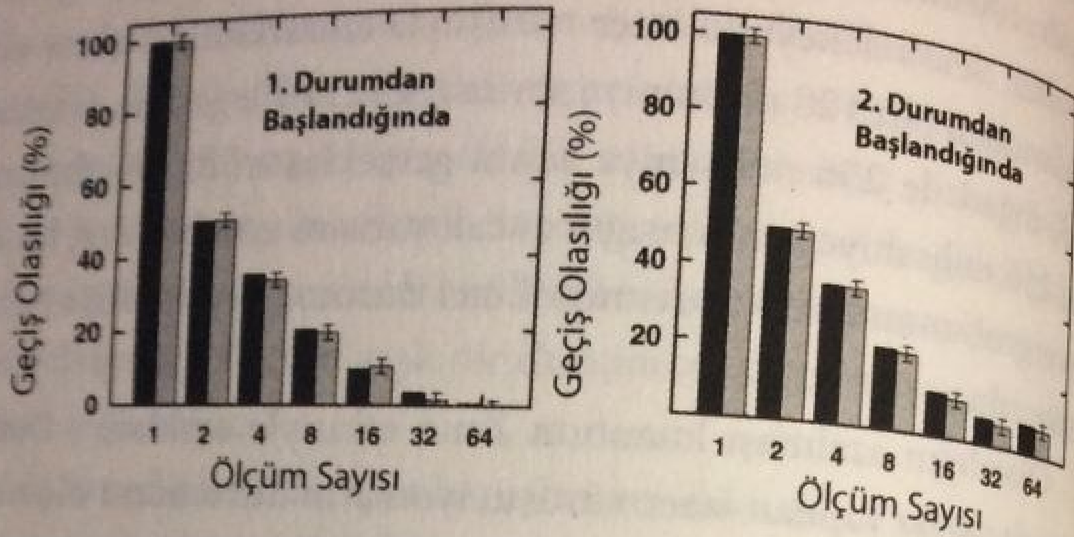
Olasılığın azalması kuantum Zeno etkisiyle açıklanır. Deneyin ortasında yapılan lazer vuruşu, iyonların durumunu ölçmüştür. Birçoğu o sırada birinci durumda bulunduğundan, ölçüm dalga fonksiyonunun ikinci duruma denk düşen kısmını ortadan kaldırmıştır. Bu atomlar artık yüzde 100 birinci durumdadırlar; ikinci durum olasılığının yavaş yavaş artmasıyla geçiş sürecinin yeniden başlaması gerekmiştir. Yine bir 128 milisaniye sonra bu iyonları ikinci halde bulma olasılığı ancak yüzde 50'dir.

Birinci durumdan ikinci duruma geçiş olasılığı başka ölçümlerle daha da azaltılmıştır. Dört lazer vuruşu yapıldığında (64, 128, 192 ve 256. milisaniyelerde) atomların ancak yüzde 35'i geçişi tamamlamıştır. Sekiz vuruş yapıldığında, geçişi ancak yüzde 19'u tamamlamıştır. Deney süresi boyunca toplam 64 (her dört milisaniyede bir) lazer vuruşu yapıldığında atomların yüzde 1'inden daha azı geçişi tamamlayabilmiştir. Aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere, bu olasılıkların hepsi de kuantum Zeno etkisinin kuramsal öngörüleriyle mükemmel bir uyum gösterir.

"Yani bir ölçüm yaptığında, iyonlar bir foton soğuruyor ve bu da dalga fonksiyonunu mu çökertiyor?"

"Aslında iyonun foton soğurmasına gerek yok. Wineland grubu bu deneyi ikinci durumdaki iyonlarla başlayarak tekrarladı. Bu durumda, iyon 'karanlık' durumda başlar; ölçümler sırasında hiç foton soğurmaz. Yine aynı sonuca varıldı; ikinci durumdan birinci duruma geçiş olasılığı tam tahmin edildiği gibi ölçüm

fazlalaştıkça azalır."



Wineland grubunun (W.M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger ve D. J. Wineland Phys. Rev. A 41, 2295-2300 [1990], izinle değiştirilip yeniden basılmıştır) yaptığı deneyde bir durumdan diğerine geçme olasılığı. Siyah çubuklar kuramsal tahminleri, gri çubuklar deneysel sonuçları gösterir; hata çubuklarıysa deneysel belirsizliği. Deneye iyonların birinci durumda olduğu halden başlansa da ikinci durumda olduğu halden başlansa da ölçüm sayısı arttıkça durum değiştirme olasılığı azalır.

"Bir dakika, dur bakalım. Foton soğurmamak foton soğurmakla aynı şey mi?"

"Fotonları ölçüm aygıtları olarak düşünürsen, evet. İki kutudan birinde bulunan ödül gibi; kutulardan birini açıp boş olduğunu görürsen ödülün diğer kutuda olması gerektiğini anlarsın. Bu da sanki kutuyu açıp ödülü orada görmüşsün gibi ödülün durumunu belirler."

"Ama pek de eğlenceli değil, ödülü alamıyorum."

"Ya, evet, çok zor bir hayatın var."

Kuantum Zeno etkisi, kuantum mekaniğinin belli bir yorumuna dayanmaz. Kopenhag yorumunun dilini kullanıp dalga fonksiyonunun çöküşünden bahsederek neler olup bittiğini

tartışmak kolaydır; ama olup bitenler çoğul dünyalar yorumuna başvurarak da o kadar iyi betimlenebilir. Çoğul dünyalar yorumunda, her ölçümde, dalga fonksiyonunda yeni dallar belirir; ama bizim daha yüksek olasılık dalını algılamamız daha olasıdır. Bir durum değişimini görme olasılığı her iki yorumda da aynıdır.

Kuantum Zeno etkisini, bir sistemin durum değiştirme olasılığını azaltmak için, sistemi birçok kez ölçerek kullanabiliriz. Değişim olasılığını hiçbir zamana tam olarak sıfıra indiremeyiz; ölçümlere rağmen sistemin değişmesi olasılığı her zaman vardır; ama bu olasılığı çok küçültebiliriz; bu da kuantum ölçümünün gücünü gösterir.

"İnsanlar çok aptal. Geçiş sürecini durdurmak istiyorsan, mikrodalgayı kapatmak daha kolay olmaz mı?"

"Evet, kesinlikle, ama burada asıl mesele kuantum Zeno etkisinin gerçek olduğunu göstermek. İyonların durum değişimini durdurabildiği için değil, kuantum fiziği hakkında söylediği şeyler yüzünden ilginç."

"Evet, ama ne yararı var? Yararlı bir şey yapabiliyor mu?"

"Evet, kuantum Zeno etkisini, nesneleri, ışık soğurmalarına gerek bırakmadan tespit etmekte kullanabilirsin."

"Nesneleri... Tavşanları mesela?"

"Kesinlikle, varsayımsal olarak."

"Ooo! Bak bu kulağa harika geliyor!"

Bakmadan Ölçmek: Kuantum Sorgulama

Kuantum Zeno etkisi muhteşem şeyler yapmak için kullanılabilir. Innsbruck Üniversitesi ile Los Alamos Ulusal Laboratuvarı arasında yapılan bir işbirliği, ışık soğuran bir nesnenin varlığını, ışık kullanarak, ama kuantum Zeno etkisiyle fotonun bir yerden diğerine hareket etmesi durdurulup nesnenin foton soğur-

maması sağlanarak tespit etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. İlerde bu teknik bir tek fotonu bile soğurmaya dayanamayacak kadar hassas kuantum sistemlerinin özelliklerini incelemekte kullanılabilir.

	Tavşan yok		Tavşan	
Başlangıç	%100	%0	%100	%0
25 vuruş	%85	%15	%100	%0
50 vuruş	%50	%50	%100	%0
100 vuruş	%0	%100	%100	%0

Aygıtın sol tarafında iki ayna arasında gidip gelen bir fotonla başlarız. Fotonun ortadaki aynadan sızması gibi küçük bir olasılık vardır; böylece zamanla foton aygıtın sağ tarafına geçer. Sağ tarafta soğuran bir nesne, örneğin bir tavşan varsa, nesne kuantum Zeno etkisi yüzünden fotonun hareket etmesini engelleyecektir.

İşte bu kuantum sorgulama deneyinin sadeleştirilmiş bir versiyonu. Mükemmel sırlanmış iki ayna arasında gidip gelen tek bir fotonumuz olduğunu düşünelim. Bu iki aynanın arasına o kadar da mükemmel olmayan üçüncü bir ayna yerleştirelim.

Bu sistemin dalga fonksiyonu iki kısımdan oluşur: Bir kısım, fotonun aygıtın sol tarafında bulunmasına; diğer kısım fotonun

sağ tarafta bulunmasına karşılık gelir. Deneye, sol yarıda bir fotonla başlarsak zaman içinde fotonun yavaşça sağ yarıya geçtiğini fark ederiz. Foton ortada bulunan kusurlu aynaya her çarptığında, öbür tarafa geçmesi gibi küçük bir olasılık vardır; bu yüzden de dalga fonksiyonunun sol kısmı biraz küçülürken, sağ tarafı biraz büyür. Nihayetinde dalga fonksiyonunun sol kısmı sıfıra inecek ve fotonu sağ tarafta bulma olasılığı yüzde 100 olacaktır. Sonra süreç tekrarlanır. Foton "yavaşça" aygıtın iki tarafı arasında gidip gelir, çalkalanır; tıpkı NIST deneyindeki iyonların birinci durum ile ikinci durum arasında hareket etmesi gibi.

Fotonun konumunu ölçmek için bir aygıt ekleyerek, örneğin aygıtın sağ tarafına bir tavşan koyarak kuantum Zeno etkisini tetikleyebiliriz. Foton ortadaki aynaya her çarptığında tavşan, fotonun aynadan geçip geçmediğini ölçer; çok ürkek olduğundan, sağ tarafta tek bir foton bile tespit etse kaçıp gidecektir.

Tavşanın olmaması durumunda gerçekleşen "çalkalanma" etkisi, tavşanın var olması durumunda kuantum Zeno etkisi yüzünden engellenecektir. Foton aynadan geçerse, tavşan onu soğurur ve kaçar. Foton artık yoktur, bu yüzden de dalga fonksiyonu sıfırdır, bundan sonra hiçbir şey değişmez. Geçemezse, foton kesinlikle sol taraftadır ve dalga fonksiyonu, fotonun sol tarafta olduğu hali alır ve her şey yeniden başlar.

Kuantum Zeno etkisi, her köpeğin yapmak istediği şeyi yapmamızı mümkün kılar: Aygıtın içinde tavşan olup olmadığını onu kaçırmadan belirlememizi sağlar. Aygıtın sol tarafında bir fotonla başlarız; onun sağ tarafa geçmesine yetecek kadar bir süre bekleriz; sonra aygıtın sol tarafına bakarız. Orada foton yoksa sağ tarafta tavşan yoktur; ya fotonu soğurup kaçmıştır ya da orada hiç tavşan olmamıştır ve foton da sağ tarafta çalkalanmaktadır. Foton hâlâ aygıtın sol tarafındaysa sadece bir tavşan olduğunu değil, tavşanın hâlâ orada olduğunu, tek bir ışık fotonu bile soğurmadığını biliriz.

Fotonun sağ tarafa geçip tavşanı korkutması ihtimali hep vardır; ama fotonun aynadan geçmesi olasılığını azaltarak bu olasılığı istediğimiz kadar düşürebiliriz. Fotonun sağ tarafa "geçmesi" için gereken süre artacağından ölçümü tamamlamak için daha uzun süre beklememiz gerekir; ama tavşanı tespit etme olasılığımız ciddi bir artış gösterecektir. Fotonun, sağ tarafa geçmeden önce sol tarafta iki ayna arasında 100 kere gidip gelmesi gerekiyorsa korkutup kaçırmadan bir tavşan tespit etme olasılığı yüzde 98,8'dir. Deneyi 1000 kere tekrarlarsanız sadece 12 tavşan korkup kaçacaktır.

"Ooo! Yani benim sadece büyük aynalara ihtiyacım var!"

"Hayır. Bu deneyi arka bahçeye kuramazsın."

"Ama tavşanları yakalamak için kuantum Zeno etkisini kullanabilirim."

"Hayır... Hayır. Arka bahçeye büyük aynalar koymuyorsun. Bu son sözüm."

"Aman, pof!"

Kuantum sorgulaması, tavşan yakalamakta kullanılmamıştır; Innsbruck, Los Alamos ve Illinois'deki fizikçiler tarafından polarize foton kullanılarak deneysel olarak gösterilmiştir. Kuantum sorgulaması bazı inanılmaz işler yapmanızı mümkün kılar; örneğin nesnelerin fotoğrafını, onlara hiç ışık çarptırmadan çekmenizi sağlar. Bu casusluk amacıyla işe yarar bir şey değildir (düşmanlarınızı, sırlarını iki ayna arasına saklamak zorunda bırakmazsanız); ama bir fotonun soğurulmasına dayanamayacak süperpozisyon durumlarındaki büyük atom toplulukları gibi hassas kuantum sistemlerinin incelenmesi için temel önemde olabilir.

İster dalga fonksiyonunun çökmesiyle, ister genişleyen tek bir dalga fonksiyonunun uyum bozulması sürecinden geçmesiyle düşünün, kuantum Zeno etkisi kuantum ölçümünün tuhaf niteliğini gösteren önemli bir etkidir. Klasik ölçümün tersine, bir

kuantum sisteminin ölçümü o sistemin durumunu değiştirir; bu klasik olarak beklediğimizden çok farklı bir şeydir. Deneysel ortamın akıllıca düzenlenmesiyle, bu, bir sistemin durum değiştirmesini engellemek ya da bir sistemden onunla doğrudan etkileşime girmeden bilgi almak için kullanılabilir.

"Bu gerçekten ilginç. Tuhaf ama ilginç."

"Teşekkürler."

"Şimdi, izin verirsen, kaseme bakmam lazım."

"Nedenmiş o?"

"Daha fazla yiyecek almak için Zeno etkisini kullanacağım. Düşündüm de kasemi hep ağzına kadar doluyken ölçersem ne kadar yersem yiyeyim hep mamam olur. Bu da gayet hoş olurdu hani."

"Tabii, kaseni boşken ölçersen hep boş kalır ve hiç maman olmaz."

"Ay, bu berbat olurdu. Bak bunu hiç düşünmemiştim."

"Her neyse. Bunun işlemesi için mamanın kasede belirmesine yarayacak doğal kuantum süreçlerini kullanman lazım. Şeyler, sırf sen onları ölçmek istedin diye ortada hiç sebep yokken belirmez."

"Eh, sen bazen kaseme mama koyuyorsun, değil mi? Doğal bir süreçsin."

"Bir bakıma."

"Öyleyse kaseme mama koymaya ne dersin?"

"Peki, peki. Neredeyse yemek vakti. Hadi gel."

"Ooo! Mama!!!"

VI

Kazmaya Gerek Yok: Kuantum Tünelleme



Arka bahçede, güneşli güzel bir öğleden sonranın tadını çıkarıyoruz. Şezlonga oturmuş, kitap okuyorum; Emmy de çimlerin üzerine serilmiş, güneşleniyor; bir gözüyle de sincapları kolluyor.

"Bir şey sorabilir miyim?" diyor.

"Hmm? Elbette, sor bakalım."

"Tünelleme hakkında ne biliyorsun?"

"Tünelleme, ha?" Kitabımı bırakıyorum. "Bir parçacığın, bir engelin öbür tarafına, o engeli aşacak enerjisi olmamasına rağmen geçebildiği bir süreçtir."

"Engel ha? Çit gibi mi yani?"

"Metaforik olarak evet diyebiliriz."

"Bu bahçeyle diğeri arasındaki çit gibi mi?" Gerçekten de umutlu görünüyor.

"Aha! Bununla mı ilgiliydi?"

"Tavşanlar var orada!" Kuyruğunu bir dakika kadar sallıyor, sonra yılmış görünüyor. "Ama onlara ulaşamıyorum."

"Doğru, ama sanma ki bunun çözümü tünelleme olur. Küçük parçacıklarda işe yarar o, köpeklerde işlemez."

"Neden ama?"

"Bak, bir engeli potansiyel ve kinetik enerji açısından düşünebilirsin. Örneğin şimdi senin bütün enerjin potansiyel enerji; çünkü hareket etmiyorsun. Ama diyelim, bir sincabın peşine takılırsan hareket etmeye başlayabilirsin ve bu potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirirsin."

"Çok hızlıyımdır. Çok enerjim var."

"Evet, biliyorum. Bizim için büyük sınavsın. İster hareket ediyor ol ister oturuyor, aynı miktarda enerjiye sahipsin. Mesele enerjinin hangi biçimde olduğu."

"İyi de bunun çitle ne ilgisi var?"

"Bak şimdi, çiti ancak yeterince enerjin olduğunda gidebileceğin bir yer olarak düşün. Çitin olduğu yerde olabilmek için ya çok yükseğe sıçraman ya da başka bir biçimde çitle aynı uzamı işgal etmen gerek. İkisi de acayip fazla enerji ister."

"O kadar yükseğe sıçrayamam, o yüzden de tavşanlara ulaşamıyorum."

"Evet. Çiti aşacak enerjin yok. Yeterince enerjin olmadığı için de komşunun bahçesine geçemiyorsun. Herkes böyle daha mutlu, inan bana."

"Ben hariç." Somurtuyor.

"Evet, sen hariç." Özür diler gibi kulaklarının arkasını kaşıyorum. "Yine de kuantum mekaniği çitin üzerinden aşacak enerjin olmasa bile öbür tarafa geçebilmenin hâlâ bir yolu olduğunu söyler. Sanki orada yokmuş gibi çitin içinden geçebilirsin."

"Tavşanların yaptığı gibi mi yani?"

"Nasıl, anlamadım?"

"Tavşanlar canım. Sürekli çitin bir o yanına bir bu yanına geçip duruyorlar."

"Evet, ama çitin parmaklıklarının arasına sığabildikleri için geçiyorlar. Bunun kuantum tünellemeyle bir ilgisi yok." Bir an duruyorum. "Ama tabii, kötü bir benzetme değil. Tavşanların da çitin üzerinden aşacak enerjileri yok, ama içinden geçebili-

yor ve öbür tarafa ulaşabiliyorlar. Bu da bir şekilde tünelden geçme gibi."

"Peki, ben nasıl çitte tünel açacağım?"

"Biraz daha az yiyip tavşanlar gibi parmaklıklar arasına sığabilecek kadar zayıflayabilirsin."

"Bu planı sevmedim. İyi bir köpeğim. Aldığım ödülleri hak ediyorum."

"Evet, hak ettiğin ödülleri de alıyorsun. Diğer seçenek çitte kuantum tüneli açmak olurdu, ama kuantum tüneli senin *yaptığın* bir şey değildir, oluveren bir şeydir. Engelin üzerine koca bir parçacık grubu gönderirsen bunların pek azı öbür tarafa geçecektir. Ama *hangilerinin* geçeceği tümüyle rastgeledir. Olasılıkla ilgilidir."

"Yani çite doğru yeterince fazla sayıda koşarsam, öbür tarafa geçer miyim?"

"Ben olsam denemezdim. Bir parçacığın bir engelden tünelleme yoluyla geçmesi, engelin kalınlığına ve parçacığın kuantum dalga boyuna bağlıdır. 22,5 kiloluk bir köpeğin yaklaşık bir santim kalınlığındaki alüminyum engelin içinden geçebilmesi olasılığı $1/e\ 10^{36}$'dır. Bunun ne olduğunu biliyor musun?"

"Neymiş?"

"Sıfır. Ya da hiç fark etmeyecek kadar sıfıra yakın. O yüzden de kalkıp kendini çitin üzerine atma."

Bir an susuyor.

"Eh, sanırım bu sorunu yanıtlıyor." Kitabımı alıyorum.

"Sayılır."

"Sayılır mı?"

"Bu kuantum mevzuu ilginç, ama ben klasik tünel açmayı düşünüyorum."

"Klasik tünel açmayı mı?"

"Çitin altına bir çukur açacağım."

"Haa!"

"İyi plan!" Kuyruğunu şevkle sallıyor, görünüşe bakılırsa kendinden memnun.

"Hayır değil. Yalnız kötü köpekler çukur açar."

"Haa." Kuyruğu düşüyor, başı eğiliyor. "Ama ben iyi bir köpeğim, değil mi?"

"Evet, sen çok iyi bir köpeksin. En iyisisin."

"Göbeğimi kaşır mısın?" Sırt üstü yatıyor ve ümitli görünüyor.

"Ah peki..." Kitabımı yine bırakıp göbeğini kaşımak için eğiliyorum.

"Tünelleme" en beklenmedik kuantum fenomenlerinden biridir; bir tür engelle karşı karşıya gelen bir parçacık, diyelim ki bir çite doğru koşan bir köpek, sanki orada değilmiş gibi engeli aşacaktır. Bu tuhaf davranış, kuantum parçacıklarının ikinci bölümde gördüğümüz dalga niteliklerinin doğrudan bir sonucudur.

Bu bölümde temel fiziğin enerji kavrayışından ve enerjinin parçacıkların bulunma biçimini nasıl belirleyeceğinden bahsedeceğiz. Maddenin dalga niteliğinin, kuantum parçacıklarının, klasik fiziğin ulaşamayacaklarını söylediği yerlere ulaşmalarını, katı nesnelerin içine girmelerini, hatta içinden geçmelerini mümkün kıldığını göreceğiz. Tünellemenin, bilim insanlarının maddenin yapısını inceleyen mikroskoplar yapmasını, biyokimya ve nanoteknolojide devrimci gelişmeler yaşanmasını mümkün kıldığını da göreceğiz.

İşleri Halletme Becerisi: Enerji

Kuantum tünellemeyi açıklayabilmek için önce enerjiyle ilgili klasik fizikten bahsetmemiz gerekiyor. "Enerji" fizikten genel kullanıma geçtiyse de fizikteki anlamı gündelik sohbetlerdeki kullanımından biraz farklıdır.

Fizikteki "enerji"nin bir cümlelik bir tanımı şöyle olabilir: "Bir maddenin enerji içeriği, kendi hareketini ya da başka bir cismin hareketini değiştirme becerisinin ölçüsüdür." Bir nesnenin hareket ettiği için ya da hareket etmeye başlayabileceği bir yerde hareketsiz durdurulduğu için enerjisi olabilir. Her nesnenin sırf kütlesi yüzünden (Einstein'ın $E=mc^2$'si) ve ısısı mutlak sıfırın üstünde olduğu için[1] bir enerjisi vardır. Bütün bu enerji biçimleri duran bir nesneyi hareket ettirmek için ya da hareket eden bir nesneyi durdurmak ya da nesnenin yönünü saptırmak için kullanılabilir.

Enerjinin en belirgin biçimi kinetik enerji, hareket eden bir nesneyle ilişkili enerjidir. Her gün karşılaşabileceğimiz bir hızda hareket eden bir nesnenin kinetik enerjisi, kütlesiyle hızının çarpımının karesinin yarısına eşittir; genellikle şöyle ifade edilir:

$$KE=1/2\ mv^2$$

Kinetik enerji her zaman artı bir rakamdır, kütleyi ya da hızı değiştirdiğinizde artar. Bir Danua'nın kinetik enerjisi onunla aynı hızda olan küçük bir Chihuahua'nın kinetik enerjisinden fazla olacaktır; hiperaktif bir Sibirya kurdunun kinetik enerjisi, onunla kütlesi aynı olan, yaşlı ve uykucu bir Bloodhound'dan daha fazla olacaktır. Kinetik enerji momentuma benzer, ama hızı artır-

---

1- Isı, bir nesneyi oluşturan tek tek atomların hareketinden kaynaklanan enerjiyi ölçer. "Mutlak sıfır" hareketin durduğu hayali ısıdır. Hiçbir gerçek nesne, mutlak sıfıra varıncaya dek soğutulamaz; soğutulsaydı bile o nesnenin, ikinci bölümde tartıştığımız üzere, sıfır noktası enerjisi olurdu.

dığınızda momentumdan daha hızlı artar ve momentumun tersine hareket yönüne bağlı değildir.

Hareket halinde olmayan nesneler, başka nesnelerle etkileşimleri yüzünden hareket etmeye başlama potansiyeline sahiptir. Buna potansiyel enerji deriz. Bir masanın üstündeki ağır bir nesnenin potansiyel enerjisi vardır: Hareket etmiyordur; ama hiperaktif bir köpek masaya çarpar da nesne, köpeğin üzerine düşerse kinetik enerji kazanır. Yan yana tutulan iki mıknatısın her birinin potansiyel enerjisi vardır: Bırakıldıklarında mıknatıslar ya birbirlerine yapışacak ya da birbirlerinden uzaklaşacaklardır. Bir köpeğin her zaman, uyurken bile potansiyel enerjisi vardır: En hafif bir gürültüde fırlayıp ortada hiçbir şey yokken havlamaya başlayabilir.

Enerji fizik açısından temel önemdedir, çünkü "korunan bir niceliktir"; enerjinin korunumu yasası enerji bir biçimden diğerine değiştirilebilse de bir sistemdeki toplam enerji miktarının değişmeden kalacağını söyler. Bu durum bazı zor problemleri muhasebe alıştırmasına çevirir: Toplam enerjinin (kinetik artı potansiyel) problemin sonunda, başında olduğuyla aynı olması gerekir; böylece toplamdan nihai potansiyeli çıkardığınızda geride kalan enerji miktarının kinetik enerji olması gerekir.[2]

Enerjinin nasıl işlediğini daha iyi anlamak için somut bir örnek üzerine düşünelim: Havaya atılmış bir top. Herhangi bir köpeğin bildiği gibi yukarıya çıkan şey aşağıya iner; başta herhangi

2- Potansiyel enerjiyi hesaplamak genellikle kinetik enerjiyi hesaplamaktan kolaydır. Potansiyel enerji genellikle etkileşim içindeki nesnelerin konumlarına dayanır; kinetik enerjiyse hıza; hızsa, yakın geçmişte olanlara dayanır. Bir enerji problemini çözmenin en kolay yolu genellikle konumu kullanarak potansiyel enerjiyi hesaplamak, ardından çıkarma yoluyla kinetik enerjiye ulaşmaktır. Örneğin bir lunapark treni yüksek bir tepenin üzerinde durursa bütün enerjisinin potansiyel enerji olduğunu biliriz. Sonra yüksekliği kullanarak potansiyel enerjiyi kolayca hesaplayabiliriz; bu da arada ne olduğunu bilmeye gerek kalmaksızın kinetik enerjiyi (dolayısıyla hızı) bulmamızı mümkün kılar.

bir hızla fırlatılmış bir top yavaşlayacak, duracak sonra da düşecektir. Bunu karşı sayfada, topun düzenli aralıklarla ölçülen yüksekliğini gösteren şekilde görebilirsiniz. Yükseklik alçak olduğunda, top hızlı hareket ediyordur; bir tablodan diğerine çok yol alır. Uçuşu sırasında zirveye yaklaştığında çok az hareket eder ve tam zirveye çıktığında bir anlığına durur.

Bu uçuşu enerji bakımından betimleyebiliriz. Fırlatıldıktan bir an sonra top hareket ediyordur, bu yüzden çok fazla kinetik enerjisi vardır; ama yere yakındır ve hiç potansiyel enerjisi yoktur. Dolayısıyla toplam enerji kinetik enerjiye eşittir. Bunu bir kavanoz dolusu ödül gibi bir tür enerji kaynağı olarak düşünebiliriz; şekilde siyah çubukla gösterilmiştir. Top yukarıya doğru hareket ederken kinetik enerjisi azalır (çünkü hızlı hareket etmiyordur) ve potansiyel enerjisi artar (çünkü yerden yüksektedir). Kinetik enerji düzeyi düşer; kinetik enerjinin yerini potansiyel enerji alır (şekilde griyle gösterilmiştir); ama toplam enerji aynı kalır.

Uçuşun zirvesine ulaştığında topun potansiyel enerjisi vardır; ama hiç kinetik enerjisi yoktur; bir saniyenin bir bölümü boyunca hiç hareket etmez. Yere düşerken, aynı süreci tersinden geçirir: Potansiyel enerjisi vardır, hiç kinetik enerjisi yoktur; sonunda kinetik enerjisi olur (başlangıçtaki miktarda), ama hiç potansiyel enerjisi kalmaz.

"Sen bunu tersinden anlamışsın!"

"Yok canım?"

"Eh, tabii ya. Ödül kavanozunun potansiyel enerji olması gerekir; çünkü ödüller yediğimde bana enerji verme potansiyeline sahiptir. Boş kavanoz da kinetik enerji olmalı, çünkü ödülleri yedikten sonra her yerde koşarım."

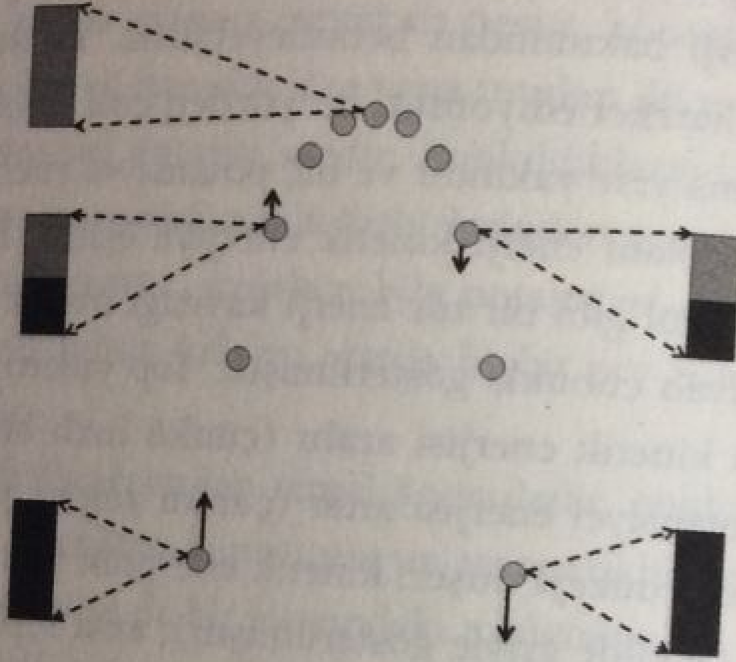
"Haklı olabilirsin. Elbette enerjiyi ödüle benzeten bir benzetme hiçbir zaman mükemmel olmayacaktır."

"Nedenmiş o?"

"Çünkü potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirebileceğin gibi, kinetik enerjiyi de potansiyel enerjiye çevirebilirsin. Bu da ödülleri kavanoza *geri* koymak gibi olurdu."

"Ah, ben hiç öyle yapmam."

"Inan bana, fark ettik."



Yukarı fırlatılan bir top başlangıçta yukarıya doğru hızla hareket eder; kütleçekim (yerçekimi) yüzünden yavaşlar, geri döner, düşer. Resimler düzenli aralıklarla bakıldığında topun hangi konumda olduğunu göstermektedir. Sütunlar topun enerjisini gösterir; siyah kinetik enerjiyi, gri potansiyel enerjiyi temsil eder. Yere yakınken enerjinin tamamı kinetik enerjidir; uçuşun zirve noktasındayken enerjinin tamamı potansiyel enerjidir.

Uçuş halindeki bir topun enerjisine bakarak enerjinin topun hareketini sınırladığını da görebiliriz. Top, tümüyle kinetik, toplam bir enerjiyle başlar; yukarıya çıktıkça bunu potansiyel enerjiye çevirir. Baştaki kinetik enerji potansiyel enerjiye döndüğünde, topun hareketi kesilir. Top belli bir maksimum yüksekliğin üstüne çıkamaz, çünkü bu toplam enerjisinin artmasını gerektirecek-

tir ve böyle bir şey de olamaz.[3] Belli bir miktar enerjisi olan topun ulaşabileceği yüksekliğe "dönüm noktası" denir; çünkü bu noktada topun yönü tersine döner. Dönüm noktasının üstündeki yükseklikler "yasaktır"; çünkü topun o yüksekliklere ulaşacak enerjisi yoktur.

Sıçrayan Dalga Fonksiyonunu İzle: Bir Kuantum Topu

Fırlatılan top, eylem halindeki enerjinin basit bir örneğidir; onu enerji bakımından düşünmek o kadar da yararlı görünmeyebilir. Gerçi enerji analizi, enerjiyi kullanarak *ancak* matematiksel olarak tanımlanabilecek sistemler de dahil olmak üzere, başka birçok karmaşık sisteme uygulanabilir. Bunun sonuçlarından biri, enerjinin fizikçilerin dünyayı anlamak için başvurduğu en önemli araçlardan biri olmasıdır.

Kuantum mekaniğinden bahsettiğimizde enerji özellikle önemlidir. İkinci bölümde gördüğümüz üzere, kuantum parçacıklarının iyi tanımlanmış bir konumu ya da yönlü hızı yoktur; bu yüzden de klasik bir sistemde yaptığımız gibi bu özelliklerin izini sürmenin bir yolu yoktur. Fakat enerjinin korunumu hâlâ geçerlidir; böylece kuantum sistemlerini enerjilerine bakarak anlayabiliriz. Aslına bakarsanız Schrödinger denklemi bir kuantum nesnesinin dalga fonksiyonuna ne olduğunu o nesnenin potansiyel enerjisini kullanarak bulur; bu yüzden kuantum mekaniğin-

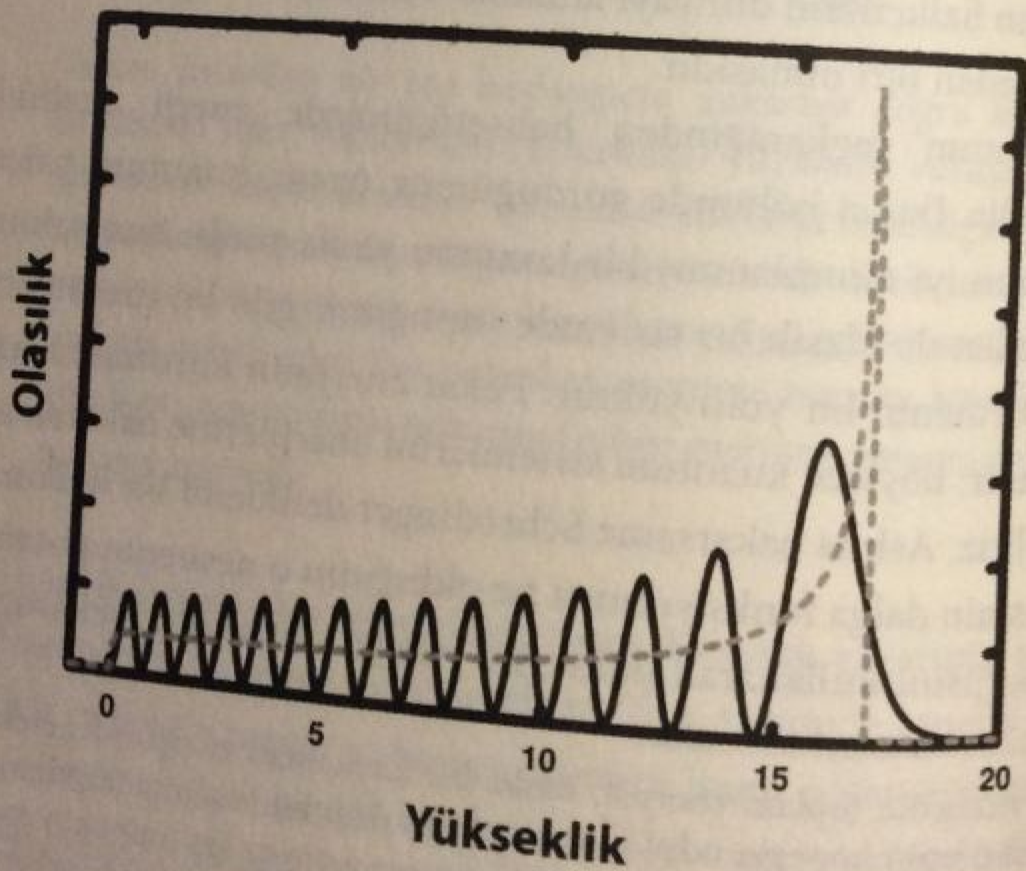
---

3- Bir nesnenin toplam enerjisi, başka bir kaynaktan enerji ekleyerek artırılabilir; tıpkı köpeğin ödül kavanozunun dost bir insan tarafından doldurulması gibi. Ama fazladan enerji bedavaya gelmez; dış nesnenin enerjisi azalmalıdır; tıpkı ödülleri alabilmek için bir insanın banka hesabındaki paranın azalması gibi. Toplar, köpekler, ödüller ve insanlar; bütün evrenin toplam enerjisi bir sabittir, Büyük Patlama'dan bu yana geçen on dört milyar yıl içinde de artmamış ya da azalmamıştır.

de yapılan her hesaplama temelde enerjiyle ilişkilidir.

Enerjinin dalga fonksiyonlarıyla nasıl ilişkili olduğunu, bir kuantum topunun havaya atıldığını düşünerek bulabiliriz. Topun enerjisi hakkında bildiklerimizi paylaşarak dalga fonksiyonunun bazı yönlerine dair öngörülerde bulunabiliriz. Kinetik enerji momentuma benzer; birinci bölümden, momentumun dalga boyunu belirlediğini biliyoruz. Yere yakınken, kinetik enerji yüksekken toplun momentumu yüksek, bu yüzden de dalga boyu kısa olmalıdır. Daha yukarıda, top yavaşça hareket ediyorken momentumu düşüktür ve dalga fonksiyonunun da daha uzun bir dalga boyu olması gerekir. Topun dönüm noktasının üstünde olması olasılığının da sıfır olmasını bekliyoruz; çünkü top baştaki enerjisinin mümkün kıldığından daha yükseğe çıkmamalıdır.

Bu sistemin dalga fonksiyonunu hesaplayabiliriz; şuna benzer bir olasılık dağılımı buluruz:

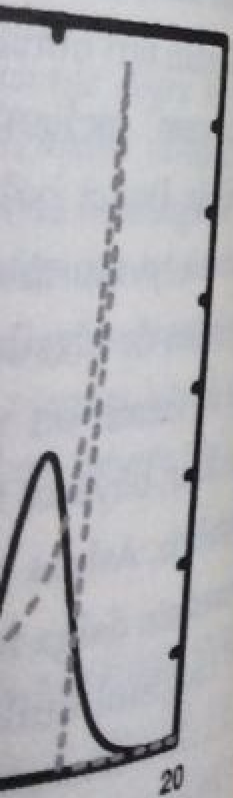


Kesintisiz çizgi, belli bir yükseklikte bir kuantum parçacığı bulmanın olasılık dağılımını gösteriyor. Kesintili çizgi ise klasik bir parçacığın olasılık dağılımı...

Bu grafiğe baktığımızda az çok, beklediğimiz şeyi görüyoruz. Olasılık dağılımı alçak yükseklikte (solda), yüksekte olduğundan daha hızlı salınıyor. Fakat daha yakından baktığımızda tuhaf bir şey fark ederiz: Olasılık, klasik dönüm noktasında (kesintili eğrinin sıfırı bulduğu yaklaşık 17 birim yükseklikte) tam olarak sıfır olmaz. Sıfıra düşer, ama dönüm noktasının üstünde hâlâ ciddi bir olasılığın bulunduğu yükseklikler vardır. Topu, asla ulaşamayacağı yüksekliklerde bulma olasılığı vardır hâlâ!

Olasılık neden tam dönüm noktasında sıfır olmaz? Eğer olsaydı o noktada dalga fonksiyonunda ani bir değişiklik olurdu. İkinci bölümde öğrendiklerimizden dalga fonksiyonunda ani bir değişiklik yaratmanın, farklı dalga boylarında muazzam sayıda dalga fonksiyonunu birbirine eklemeyi gerektirdiğini biliyoruz. Birçok dalga boyunun olması momentumda büyük bir belirsizlik, dolayısıyla kinetik enerjide büyük bir belirsizlik anlamına gelir. Fakat enerjide büyük bir belirsizlik *yoktur*; topu ne kadar sert fırlattığımızı biliyoruz. Enerjide küçük bir belirsizlik, dönüm noktasının konumunda büyük bir belirsizliğe yol açar; bu da dalga fonksiyonunda keskin değişiklikler olmayacağı ve bir dalga fonksiyonunun yasak bölgeye doğru genişleyebileceği anlamına gelir.

Top hem iyi tanımlanmış bir enerjiye sahip olup hem de klasik fiziğin olması gerektiğini söylediği yerde olamaz. Enerjide küçük bir belirsizlik istiyorsak konumda daha büyük bir belirsizliği kabul etmemiz gerekir; bu da topu klasik fiziğin mümkün gördüğünden daha yüksekte bulma olasılığımız olacağı anlamına gelir.



"Bu kıpırdanmalar zirveye yakınken neden büyüyor?"

"Bunu söyledim zaten. Top daha yavaş hareket ediyor, bu yüzden de dalga boyları uzuyor."

"Evet, ama daha da yüksek oluyorlar."

"Ha şu mesele. Bunun sebebi de topun yavaşlaması. Top, uçuşunun tepe noktasına yakınken, yavaş hareket ediyorken, yere

yakınken, hızlı hareket ediyorken harcadığından daha fazla zaman harcıyor. Olasılık dağılımını incelersen aynı şeyi klasik topta da görürsün, kesintili eğride yani."

"Bir dakika, bir dakika, topun en olası konumu yukarıda olması mı yani?"

"Hı hı. Bir önceki sayfada topu uçarken gösteren şekle bakarsan görebilirsin. Topun yüksekte çekilmiş fotoğraflarının sayısı, alçakta çekilmişlerden fazladır. Atmaca-kapmaca oynarken, topu genellikle uçuş sırasında yüksekteyken yakalamanın sebebi de bu; çok hızlı hareket etmiyor, o yüzden yakalaması kolay."

"Yakalamakta üstüme yoktur. Aaa! Atmaca-kapmaca oynamaya gidelim! Çok eğlenceli!"

"Bu bölümü bitirelim de öyle, olur mu? Tünellemeden daha bahsetmedim."

"Ah, peki. Tünellemeden bahsedelim. Katı nesnelerin içinden geçmek atmaca-kapmacadan daha zevkli."

"Fazla umutlanma canım..."

Hiç Orada Yokmuş Gibi: Engellerin İçine Girme ve Tünelleme

Dönüm noktasındaki belirsizlik nasıl olur da parçacıkların katı nesnelerin içinden geçmesine yol açar? Katı bir nesnenin içi yasak bölgedir; iki nesneyi oluşturan atomlar arasındaki etkileşimler bir nesnenin diğerinin içinde olması durumunda potansiyel enerjiyi muazzam boyutlara çıkarır. Zaten huysuz bir köpeğin bulunduğu bir kulübeye ikinci bir köpek bağlamaya benzer bu biraz; ikinci köpeği oraya sokmanız zor olacaktır, soktuğunuzda da muazzam bir fazladan enerjiyle karşılaşırsınız; hırlamalar, havlamalar, çatırtılar biçiminde.

Fakat kuantum mekaniğinde dalga fonksiyonları yasak bölge-

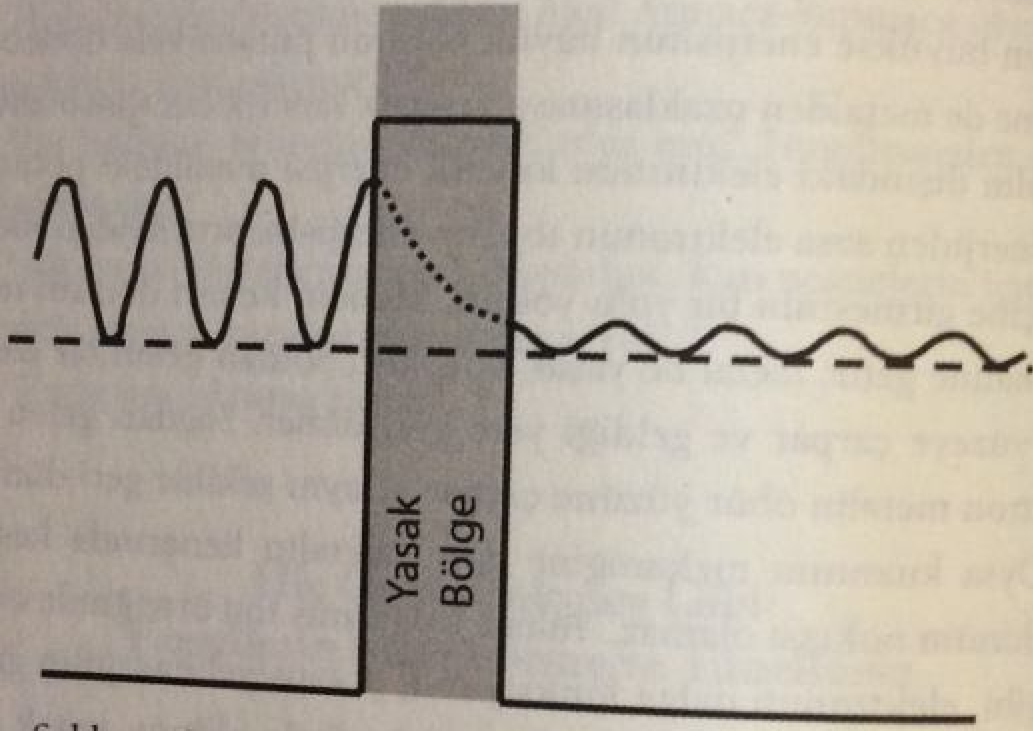
lere girebilir ve bu katı nesnelerde bile söz konusu olabilir; küçük de olsa bir nesneyi diğerinin içinde bulma olasılığı vardır. Dahası, yasak bölge çok darsa kuantum mekaniği bir nesnenin, bırakın öbür tarafa geçmeyi, yasak bölgeye girmeye yetecek kadar enerjisi olmasa bile başka bir nesnenin *içinden* geçebileceği öngörüsünde bulunur.

Bunun en basit örneği, bir elektronun, potansiyel enerjisi onunkinden çok daha fazla olan ince bir metal parçasına çarpmasıdır. Klasik fizik bize, elektronun metalin dışındaki kinetik enerjisinin, metalin yakınına geldiğinde neler olacağını belirlediğini söyler. Elektronun kinetik enerjisi metalin potansiyel enerjisinden büyükse enerjisinin büyük bölümü potansiyele dönebilir ve yine de metalden uzaklaşmaya yetecek kinetik enerjisi olabilir. Metalin dışındaki elektronun kinetik enerjisi metaldeki potansiyel enerjiden azsa elektronun toplam enerjisini artırmadan metalin içine girmesinin bir yolu yoktur. Metalin kenarı dönüm noktası haline gelir; metal de yasak bölgedir: Soldan gelen bir elektron yüzeye çarpar ve geldiği yere geri döner. Sağdan gelen bir elektron metalin öbür yüzüne çarpar ve aynı şekilde geri döner.

Oysa kuantum mekaniğine göre, metalin kenarında keskin bir dönüm noktası olamaz. Yukarı fırlatılmış top örneğinde olduğu gibi, elektronun dalga fonksiyonu, potansiyel enerjinin gelen parçacıkların kinetik enerjisinden daha fazla olduğu yasak bölgeye doğru ilerler. Klasik fizik yasak olduğunu söylese de metalin içinde elektron bulma olasılığı vardır. Yasak bölgede parçacık bulma olasılığı metalin kenarının yakınlarında en yüksek düzeydedir; metalin içinde ilerledikçe bu olasılık hızla azalır. Yasak bölge yeterince uzun bir mesafeye uzanıyorsa olasılık sıfıra düşer ve bu da her şeyin sonu olur.[4]

4- Kesin bir ifadeyle, olasılık hiçbir zaman tam olarak sıfır olmaz; bu olasılığı betimleyen matematiksel fonksiyon bir üslü sayıdır ve elektron engelin içinde hareket ederken sıfıra yaklaşsa da hiç sıfıra ulaşmaz. Kuan-

Fakat çok dar bir engel söz konusu olduğunda, elektronları girdikleri yasak bölgenin öbür ucunda bulma olasılığı mevcuttur. Bu noktanın ötesinde, artık orada olmaları yasak değildir; yine boş uzaydadırlar ve başta sahip oldukları enerjiyle hareket ederler. Deneyi izleyen biri, diyelim ki gelen bir milyon parçacıktan çok küçük bir kısmının, sanki orada yokmuş gibi engelin içinden geçtiğini görecektir. Buna tünelleme denir; çünkü elektronlar, onlar için imkânsız olsa da yasak bölgeye girmişlerdir. Bir anlamda, tıpkı bir çitin altından tünel kazan bir köpek gibi, engelin altından geçmişlerdir.



Soldan gelen bir elektron için olasılık dağılımı; elektron engele çarpar; burada bir elektronun potansiyel enerjisi elektronumuzun toplam enerjisinden fazla olur. Olasılık yasak bölgenin içinde hızla düşer, ama sıfıra ulaşmaz; bu yüzden de elektronumuzu engelin sağ tarafında bulma olasılığı hâlâ vardır.

---

tum fiziği, havaya fırlatılan bir topun, klasik fiziğe göre çıkabileceği azami yükseklikten başlayıp Ay'a varan yasak bölge tünelinden geçmesi yönünde çok küçük bir olasılık bulunduğunu öngörür. Fakat bu çok da iyi bir tahmin değildir; bu olasılık o kadar küçüktür ki pratik amaçlarla bakıldığında sıfırdan farkı yoktur.

Bu durumun dalga fonksiyonu yukarıda gösterilmiştir. Solda, bir momentumu ve enerjisi olan, dalga boyu iyi tanımlanmış bir dalga boyuyla[5] temsil edilen, gelen bir elektron vardır. Elektron metalin kenarına geldiğinde, yasak bölgeye girer ve olasılık hızla artar. Yasak bölgenin sağ kenarına varmadan olasılık sıfır olmaz; bu yüzden de oradan, soldakiyle aynı dalga boyunda bir dalga olarak çıkar.

Bariyerin sağındaki dalganın yüksekliğinin daha az olması, elektronu sağda bulma olasılığının solda bulma olasılığından düşük olduğunu gösterir. Engelin kalınlığı arttıkça, tünelleme olasılığı da katlanarak azalır; kalınlığı iki katına çıkarırsanız olasılık baştaki olasılığın yarısından çok daha az olur. Öte yandan gelen elektronların enerjisi arttıkça yasak bölgede daha fazla ilerlerler; içlerinden birinin bütün yolu aşma olasılığı artar.

"Yani elektronlar engelde delik mi açıyor?"

"Hayır, sanki orada değilmiş gibi içinden geçiyor. Delip geçecek kadar enerjileri yok."

"İyi de bunu nasıl yapıyorlar?"

"Bak şimdi elektronlar engelin öbür ucunda, ona çarpmadan önceki enerjiyle beliriyor. Engelin içinde küçük delikler açıyor olsalardı bu süreçte enerji kaybederlerdi, biz de bunu tespit edebilirdik."

"Belki de gerçekten çok küçük deliklerdir, ha?"

"Hayır. Bunu taramalı inceleme mikroskobuyla görebiliriz, delik falan yok."

"Taramalı inceleme mikroskobu da neyin nesi?"

"Mükemmel, gayet yerinde bir soru..."

5- Konumdaki belirsizliğin çok büyük olduğuna dikkatinizi çekerim. Elektron yasak bölgenin solunda herhangi bir yerde olabilir.

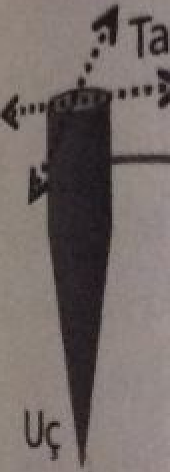
Tek Tek Atomları Hissetmek: Taramalı Tünel Mikroskobisi

Tünellemenin, tartıştığımız diğer tuhaf kuantum fenomenlerinin çoğuna nazaran daha doğrudan bir teknolojik uygulaması vardır. Tünelleme, taramalı tünelleme mikroskopu (scanning tunneling microscobe/STM) denilen, tek tek atomlar kadar küçük nesnelerin görüntülerini almak için elektron tünelini kullanan bir aygıtın temelini oluşturur. Taramalı tünelleme mikroskopu 1981'de IBM Zürih'te geliştirilmiş, katı maddelerin atomik yapısını inceleyen insanlar için temel önemde bir aygıt haline gelmiştir. Mucitleri Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer 1986'da Nobel Fizik Ödülü kazanmıştır.

Bir STM, elektrik ileten bir maddeden ve bu maddenin yüzeyinin birkaç nanometre içine sokulan çok sivri metal bir uçtan oluşur. Uç, iletken malzemeden biraz daha farklı bir voltajda bulunur; bu yüzden de uçtaki elektronlar iletken malzemeye geçmek ister. Ama elektronlar uçtan iletken malzemeye doğruca akamazlar; çünkü sivri uç ile iletken malzeme arasındaki küçük açıklık elektronların hareketini engelleyen bir bariyer gibi hareket eder.[6]

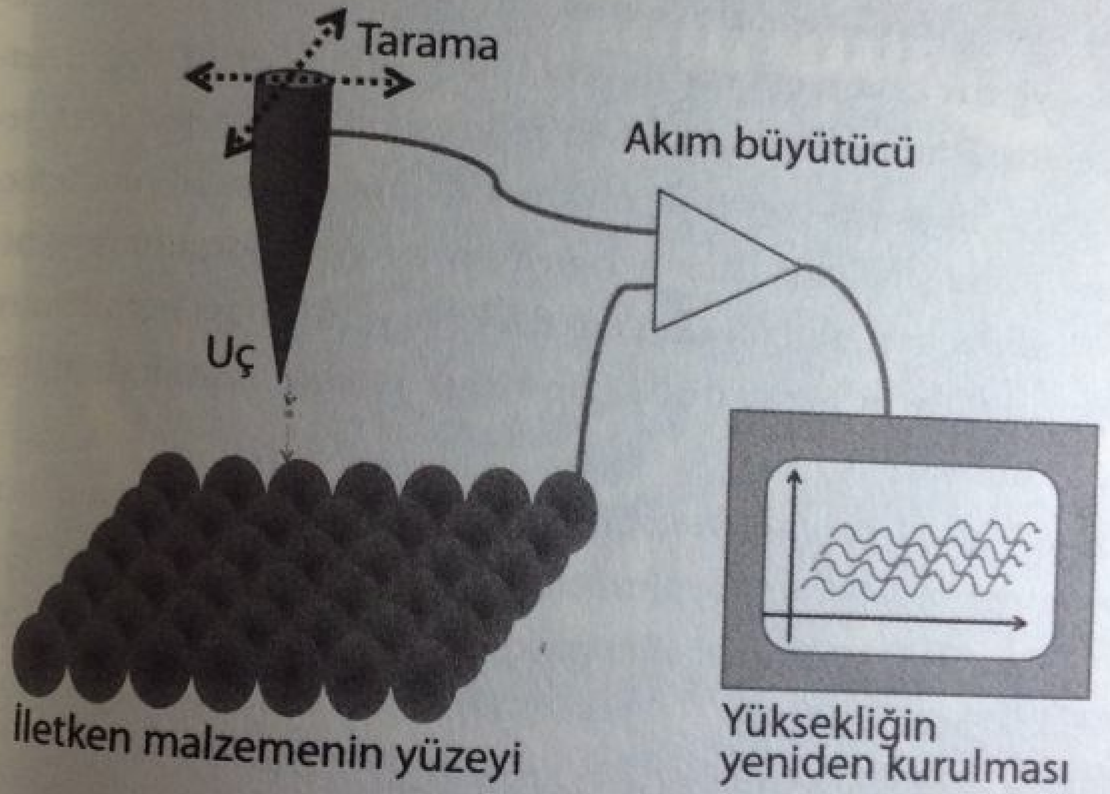
Metal uç ile iletken malzeme arasındaki mesafe yeterince azsa, örneğin bir nanometre kadarsa elektronların metal uçtan malzemeye doğru tünelleme yapması olasılığı vardır. Bu, ölçülebilen küçük bir akım oluşturur. Tünelleme olasılığı (dolayısıyla da akım oluşması olasılığı) metal uç, iletken maddenin yüzeyine yaklaştıkça ciddi biçimde artar; böylece akımdaki değişiklikler ikisi arasındaki mesafede meydana gelen ufak değişiklikleri, bir tek atomun çapından daha küçük değişiklikleri tespit etmek-

6- Bir potansiyel enerji bariyerinin katı bir fiziksel nesne olması gerekmez. Bir hava boşluğu da pekala aynı işi görür; bir ampulü lambada girmesi gereken yerin yakınında tutarak yanmasını sağlayamamanızın sebebi de budur.



te kullanılabilir.

Bir STM ile bir görüntü yaratmak, parmağınızı bir yüzeyde gezdirmeye; girintileri, çıkıntıları hissetmeye benzer. Metal ucu, yüksekliğini sabit tutarak iletken malzemenin yüzeyi üzerinde ileri geri gezdirirsiniz; metal ucu hareket ettirirken uç ile iletken malzeme arasında oluşan elektrik akımını gözlersiniz. Yüzeyde, elektronların tünel açmalarını kolaylaştıracak küçük bir çıkıntı olduğunda akım artar; küçük bir girinti olduğunda da akım azalır. Bir ızgara üzerinde çeşitli noktalarda çok sayıda yükseklik ölçümü alırsanız, bunları bir araya getirerek iletken malzemenin yüzeyini oluşturan tek tek atomların görüntüsünü oluşturabilirsiniz.



Taramalı tünelleme mikroskopunun bir grafiği. Keskin uç bir malzemenin yüzeyine yakın konumdadır ve düzenli bir biçimde ileri geri hareket ettirilir. Uçtaki elektronlar, uç ile yüzey arasındaki açıklıkta tünel açacak, küçük bir elektrik akımı yaratacaklar; bu akım büyütülüp ölçülecektir. Akım miktarı, metal uç ile yüzey arasındaki mesafeye çok duyarlıdır; bu da yüzeyin tek tek atomların tespit edilebileceği bir duyarlılıkla yeniden kurulmasını mümkün kılar.

Tek tek atomları görmekle kalmazsınız; metal ucu, iletken malzemenin yüzeyiyle doğrudan temasa sokarsanız tek tek atomları etrafa itersiniz. Bilim insanları bu beceriyi birkaç tane inanılmaz yapı elde etmek için kullanmışlardır; IBM'in Almaden araştırma laboratuarında yapılan, sonraki sayfadaki resimde gördüğünüz oval şekilli "mercan" gibi. "Mercan"ı oluşturan çıkıntılar, bakır bir yüzey üzerindeki tek tek atomlardır; STM'yle o yerlere getirilmişlerdir. Bu gibi yapılar "mercan"ın içindeki elektronların kuantum davranışlarını incelemekte kullanılabilir; bakır yüzeyin üzerinde görülen dalgalar, elektronların kuantum davranışlarıyla açıklanır.

Taramalı tünelleme mikroskopları katılar ve katıların yüzeylerine ilişkin incelemelerde devrim yaratmışlardır; bu teknoloji küçük aygıtlar ortaya çıkaracak yeni imalat tekniklerine doğru ilerleyebilir. Bazı bilim insanları bu mikroskopları tek tek DNA şeritlerini inceleyip yönlendirmekte kullanmış; genetik malzemenin davranışına dair daha ayrıntılı bir kavrayış kazanmış; genetik hasar için muhtemelen yeni ilaçlara, yeni tedavilere ulaşmışlardır. Bunların hepsi maddenin dalga niteliği sayesinde mümkün olmuştur.

"İyi güzel de mikroskobik tavşanlarla ilgilenmiyorum ben. Kuantum tünellemesi benim için ne yapmış ki?"

"Öncelikle tünelleme olmasaydı güneşli güzel bir günün tadını çıkaramazdın."

"Ne demek istiyorsun?"

"Güneş, çekirdeğindeki füzyon tepkimeleri yüzünden parlıyor değil mi?"

"Bunu herkes bilir. Caddenin aşağısındaki o küçük tazı bile bilir, hem o gerçekten de ahmak bir köpek."

"Evet. Her neyse, füzyon, protonların birbirine yapışıp hidrojenden helyum üretmesiyle işler. Protonlar artı yüklü olduklarından birbirlerini iterler; bu itiş bir engel oluşturur. Güneş ne ka-



dar sıcak olursa olsun, Güneş'teki protonların bu bariyeri doğrudan aşmalarını sağlayacak kadar enerjileri yoktur."

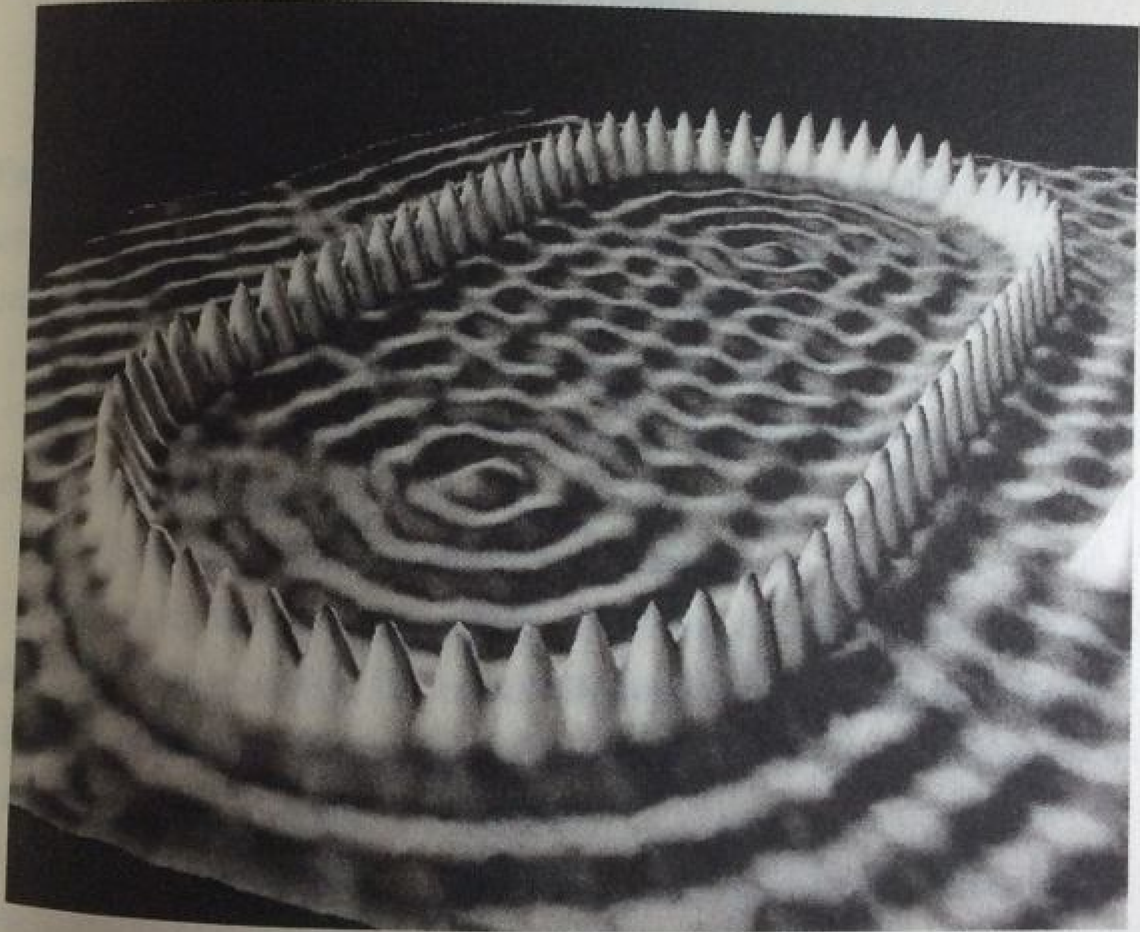
"Tünelleme mi yaparlar yani?"

"Kesinlikle. Bir protonun o bariyeri tünelleme olasılığı çok düşüktür; ama Güneş'te çok çok çok fazla proton vardır; yeterli miktarda proton tünellemeyle tepkimenin sürmesini sağlar. Yani Güneş'in parlamasını sağlayan şey aslında tünelleme."

"Hmm. Vay be, çok iyiymiş."

"Onayladığına çok sevindim."

"Atmaca-kapmaca oynayabilir miyiz şimdi?"



Bakır bir yüzeyin üzerinde bir STM kullanarak "mercan" şeklinde düzenlenmiş demir atomları. Mercanın iç kısmındaki dalga örüntüsü, bakır yüzey üzerindeki elektronların dalga niteliğinden ileri gelir. Görüntü, IBM'in izniyle yayınlanmıştır.

VII

Uzakta Tekinsiz Bir Havlama: Kuantum Dolaşıklığı



Emmy oturma odasında kestiriyor, ama ben oradan geçerken uyanıyor. Geniş geniş geriniyor, sonra da kendinden memnun, peşimden mutfağa geliyor. "Bir tavşan ölçeceğim," diyor.

"Efendim?" Hep böyle tuhaf şeyler söylüyor.

"Bir tavşanın hem konumunu hem momentumunu nasıl ölçeceğimi buldum."

"Buldun ha? Nasıl yapacaksın bunu?"

"Bak, arka bahçeye büyük bir ızgara çizeceğim, sonra da tavşan çizgilerin kesiştiği bir noktada durduğunda tek yapmam gereken ne kadar hızlı gittiğini ölçmek olacak." Gururla kuyruğunu sallıyor. "Belirsizlik, melirsizlik."

"Hı hı. Peki, tavşanın kesişim çizgisinde olduğunu nasıl ölçeceksin?"

"Ne demek istiyorsun? Sadece bakacağım."

"Tabii ya. Bu da demektir ki tavşanı göreceksin, o da seni görecek, sonra da kaçmak için hızını değiştirecek."

"Haa..." Kuyruğu düşüyor. "Bu aklıma gelmemişti."

"Bak, burayı geçtik. Belirsizlik ilkesini aşmanın bir yolu yok. Gerçekten akıllı insanlar bir yolunu bulmaya çalıştılar, ama yapı-

lamıyor. Einstein yıllarca Niels Bohr'la bunu tartıştı."

"Bir şey çıkardı mı bari?"

"Bir sürü farklı argüman geliştirdi; ama hiçbiri gerçekten işe yaramadı. Kuantum mekaniğinin, durumları birbiriyle ilişkili olsun diye hazırlanmış iki dolanık parçacığı gerektirdiği için eksik olduğu yolunda gerçekten akıllıca bir argüman bile ileri sürdü."

"Nasıl ilişkili?"

"Şimdi diyelim ki elimde iki ödül var, salya akıtmayı kes, bir düşünce deneyi bu, biri biftek, diğeri de tavuk bu ödüllerin."

"Bifteğe bayılırım. Tavuğu çok severim." Salyaları akıyor yere.

"Evet, biliyorum. Düşünce deneyi, hatırladın mı?" Bir parça kağıt havlu alıp yeri siliyorum. "Şimdi, diyelim ki bu iki ödülü ters yönlere fırlatıyorum; birini sana, birini de başka bir köpeğe."

"Sakın yapma. Başka köpekler ödüle layık değil."

"Varsayımsal olarak diyorum, takip etmeye çalış. Bifteği aldığında biliyorsun ki öbür köpek de tavuğu aldı. İyi de neden öyle üzgün görünüyorsun bakayım?"

"Varsayımsal ödül tavukları seviyorum ben."

"Sen de varsayımsal ödül biftek aldın ya!"

"Ooo! Varsayımsal bifteğe bayılırım."

"Mesele şu: Hangi ödülü *aldığını* ölçmekle, diğer ödülün ne olduğunu onu ölçmene gerek kalmadan biliyorsun."

"Ha, öyle mi? Bunda tuhaf ne var şimdi?"

"Bak şimdi, kuantum versiyonunda, parçacıkların durumu, birinden biri ölçülene kadar belirsizdir. Ödülleri fırlattığımda birini alıp biftek mi tavuk mu anlamadığın sürece ikisi de değildir. Bir anlamda ikisi birdendir."

"Tavukbiftek! Biftektavuk! Bifvuk!"

"Saçmalıyorsun. Her neyse, Einstein bunun bir sorun olduğunu düşünmüştü; bir parçacığın durumunu diğerini ölçerek tahmin edebilecek olmanın, her ikisinin de her zaman belli durumları olması gerektiği anlamına geldiğini söylüyordu."

"Anlaşılır bir şey."

"Klasik bir dünyada, kesinlikle. Ama Einstein'ın argümanı boşa çıktı; çünkü "yerellik" denilen şeyi, bir parçacığı ölçmenin diğerini etkilemeyeceğini varsaymıştı. Aslına bakarsan birinin halini ölçmen diğerinin halini mutlaka ve anında belirler."

Bundan gerçekten sıkılmış görünüyor. "Ben bu fikri sevmedim. Bir ödülden diğerine mesaj gitmesi gerekmez mi bu durumda?"

"Einstein'ın canını sıkan da buydu ve buna *Spukhafte Fernwirkung* diyordu."

"Uzakta tekinsiz eylem mi yani?" diye çeviriyor.

"Sen ne zamandan beri Almanca biliyorsun bakalım?"

"Ahbap, bir bak bana." Şöyle bir yan dönüyor, siyah-ten rengi tüylerini ve sivri burnunu gösteriyor. "*Alman çoban köpeği*, hatırladın mı?"

"Tabii ya, ne aptalım. Her neyse, evet bu Einstein'ın da canını sıkıyordu; çünkü enformasyon iki ayrı nesne arasında ışık hızından hızlı yol alamaz. Ama kuantum mekaniği yerel değildir, dolanık parçacıklar da tek bir nesne gibi davranır. John Bell diye bir adam, parçacıkların belli, kesin durumlarda sahip olduğu kuramlarda, ölçülebilecekleri sınırlamanın mümkün olduğunu; bu sınırların, dolanık kuantum parçacıkları için geçerli sınırlardan farklı olduğunu göstermişti. İnsanlar deneyler yapıp kuantum kuramının doğru olduğunu gördü. Parçacıkların durumu gerçekten de ölçülünceye kadar belirsizdir."

"Yani Einstein yanılıyordu?"

"Bu konuda, evet. Genel olarak kuantum kuramının temeli hakkında yanılıyordu."

"Ama gerçekten de akıllıydı, değil mi?"

"Evet. Einstein kesinlikle Bohr'dan daha zekiydi. Ama bütün tartışmaları Bohr kazandı, çünkü haklı olmanın avantajına sahipti." Eğilip kulaklarının arkasını kaşıyorum. "Sen de çok zekisin,

ama Einstein değilsin."

"Ama ben köpek Einstein gibiyim, ha?"

"Kesinlikle. Bildiğim kadarıyla sen köpek dünyasının Einstein'ısın."

"O zaman biraz biftek alabilir miyim ya da tavuk?"

"Olabilir." Tezgahın üzerindeki kavanozdan bir ödül alıyorum. "Ne olduğunu ölçünce anlayacaksın." Ödülü arka kapıya doğru fırlatıyorum, o da arkasından fırlıyor.

"Ooo! Belirsiz ödüller!"

Şimdiye kadar bahsettiğimiz her şey, tek parçacıklı fenomenlerdi. Etkilerin görülebilmesi için çoğu deneyin, aynı şekilde hazırlanmış farklı parçacıklar kullanarak birçok kez tekrarlanması gerekmiştir; ama temelde bahsettiğimiz bütün girişim, kırılma ve ölçüm etkileri bir seferde tek bir parçacıkla işler. Bir girişim deneyindeki her bir parçacık kendisiyle girişiyormuş gibi düşünülebilir; kuantum Zeno etkisi gibi ölçüm fenomenleri de tek bir parçacığın haliyle ilgilidir."[1]

Elbette ki içinde yaşadığımız dünyada çok fazla sayıda parçacık bulunuyor; bu yüzden de kuantum fiziğini birden fazla parçacık içeren sistemlere uyguladığımızda neler olduğuna bakmamız gerek. Baktığımızda da hiç şaşırtıcı olmamakla birlikte bazı tuhaf şeyler olduğunu görüyoruz. "Dolanık durumlar" fikrinden başlayarak.

Bu bölümde durumları birbiriyle ilişkili parçacıkları; bir parçacığı ölçmenin, öbürünün kesin durumunu belirleyeceği "dolanık" parçacıklar fikrini inceleyeceğiz. Dolanık parçacıklar, Einstein'ın kuantum kuramının karşısına çıkardığı, Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) Paradoksu olarak bilinen en ciddi güçlüğün temelinde yatar. John Bell'in bu paradoksu çözen meşhur

---

1- Dördüncü bölümde anlatılan uyum bozulması süreci, tek bir kuantum parçacığının daha geniş bir çevreyle etkileşime girmesini gerektirir; ama biz sadece parçacığın durumuyla ilgileniyoruz.

kuramından; bu kuramın, gerçeklikle ilgili genel bakış açısı üzerindeki rahatsız edici etkilerinden bahsedeceğiz. Son olarak da Bell'in kuramını kanıtlayan deneylere değinip fizikçilerin zorlayıcı yeni fikirlerde nerelere uzanabildiğini göstereceğiz.

Uyuyan Köpekler Birbirinin Yalan Söylemesine İzin Verir: Dolanıklık ve Korelasyonlar

Dolanıklık temelde, iki nesnenin durumları arasındaki karşılıklı ilişkilerle ilgilidir. Bu fikri örneklemek için iki köpek düşünelim; biz annemlerin Labrador retriever'ı RD ile kayınvalidemlerin Boston terrier'i Truman'ı düşüneceğiz; her biri, iki durumdan birinde olabilir: ya "uyanık" ya "uykuda". Köpekler birbirlerinden tamamen ayrılmışlarsa iki köpekli sistemimizi bulabileceğimiz dört durum vardır: ikisini de uyanık bulabiliriz, ikisini de uykuda bulabiliriz; Truman'ı uyanık, RD'yi uykuda ya da Truman'ı uykuda, RD'yi uyanık bulabiliriz.

İki köpeği bir araya getirip etkileşim kurmalarına izin verirsek iki köpeğin durumları arasında bir korelasyon (uyumlu ilişki) gelişir. RD uyanıkken Truman uyuyorsa RD Truman'ı birlikte oynasınlar diye uyandıracaktır, aynı şey tersi için de geçerlidir. Ya ikisi birden uyanık ya ikisi birden uykuda olur; biri uyanık biri uykuda olmaz. Dört olası hal sadece ikiye iner.

Üstelik bu korelasyon köpeklerden birinin halini ölçmeden bilmemizi sağlar. Truman uyanıksa RD'nin de uyanık olması gerektiğini biliriz; Truman uyuyorsa RD de uyuyor olmalıdır. İstersek RD'ye de bakabiliriz, ama baktığımızda sadece bildiğimiz bir şeyi doğrulamış oluruz. İki köpekten birinin halini ölçmek diğer köpeğin halini anında ve mutlak bir kesinlikle bildirir.

Kuantum Mekaniği Eksik mi? Einstein, Podolsky, Rosen Argümanı

Peki, bunun Einstein'la ne alakası var? Einstein, nedenden sonuca doğru her zaman açık bir yol izleyebileceğimiz belirlenimci evrene kuvvetle inanıyordu. Kuantum mekaniğiyle büyük felsefi sorunları vardı. Özellikle de kuantum parçacıklarının özelliklerinin ölçülünceye kadar belirsiz olması, sonra da rastgele değerler alması fikri onu çok sıkıyordu.

Einstein 1920'lerin sonundan 1930'ların ortalarına kadar kuantum kuramını güçlü bir biçimde savunan, felsefeye de eğilimli olan[2] Niels Bohr'la bir dizi tartışmaya girişti. Einstein önce, belirsizlik ilkesinin yasakladığı ölçümleri gerçekleştirecek, örneğin bir elektronun hem konumunu hem momentumunu ölçecek usta işi birkaç deneyle belirsizlik fikrine saldırdı. Bunu her yaptığında Bohr, Einstein'ın önerdiği deneyin gizli bir kusuru olduğunu gösteren yarı klasik bir karşı argüman buldu.[3]

1930'ların başında Einstein kendini belirsizliğe alıştırdı; ama kuantum kuramı onu hâlâ rahatsız ediyordu, o da saldıracak yeni bir problem buldu. Mevcut kuantum kuramının bir parçacığın özelliklerini tanımlamak için gerekli bütün bilgiyi içermediğini ileri sürdü. Einstein ile meslektaşları Boris Podolsky ve Nathan Rosen "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekaniğine Dayalı Betimlemesi Eksiksiz Sayılabilir mi?" başlıklı 1935 tarihli bir makale-

---

2- Bohr'la çalıştığı sırada belirsizlik ilkesini geliştirmiş olan Werner Heisenberg Bohr'u "esasen fizikçi değil, filozof" diye tanımlamıştı.

3- Bu örneklerin hepsinde Bohr'un argümanı, sistemin ölçülmesinin yaratacağı etkiye dayanıyordu. Süreçte, Einstein'ın konumu ölçmek için önerdiği bir şey momentumda bir değişikliğe yol açacaktı (ikinci bölümde tartıştığımız Heisenberg mikroskobu düşünce deneyinde olduğu gibi) ya da momentumu ölçmek için önerdiği bir şey konumu değiştirecekti. Sistemin ölçülmesi bir etkileşim gerektirir ve bu etkileşim de sistemin halini, ölçülen niceliklerde bir belirsizliğe yol açacak şekilde değiştirir.

de dolanık durum fikrini kullanarak bu iddiayı destekleyen dahiyane bir argüman ortaya koydular. İleri sürdükleri bu eksikliği göstermek için iki parçacığın hallerinin dolanıklaştırılmasını, sonra parçacıkların ayrılmalarını, artık etkileşim içinde olmamalarını (ama hallerinin değişmemesini) öngören bir deney önerdiler. Birbirini etkilemesi mümkün olmayan ayrı deneylerle bu iki parçacığı ölçüp neler olduğunu görebilirdiniz.

EPR (Einstein, Podolsky, Rosen) grafiğine göre, iki parçacıktan birinin (A parçacığının) konumunu ölçmek diğerinin (B parçacığının) konumunu mutlak bir kesinlikle tahmin etmenizi sağlar. Aynı zamanda, B parçacığının momentumunu ölçerseniz, A parçacığının momentumunu kesinlikle bilirsiniz. Einstein, Podolsky ve Rosen'a göre, A parçacığının B parçacığıyla ilgili ölçümün sonucunu etkilemesi ya da tersi mümkün olmadığından her bir parçacığın hem konumunun hem momentumunun her zaman kesin değerlere sahip olması gerekiyordu. Bu da kuantum mekaniğinin eksik olduğunu düşündürür: Parçacıkların kesin durumunu betimlemek için gereken bilgi vardır; ama kuantum kuramı bu bilgiyi yakalayamamaktadır.

"Ben de aynen böyle diyordum işte!"

"Ne diyordun?"

"Bir tavşancığın da belli bir konumu ve momentumu vardır. Bütün bu belirsizlik lafları sırf senin her şeyi birbirine karıştırman yüzünden."

"İkna edici bir argüman gibi geliyor; ama hatırlarsan bunun yanlış olduğunu da söylemiştim. Parlak bir hata; ama hâlâ bu fizikçilerin varsayımlarının birinde bir hata var; daha açık söylersem, bir parçacığı ölçmenin diğer parçacığın durumunu etkilemesinin mümkün olmadığı fikri hatalı."

"Yok artık! Kanıtla da görelim."

"Hemen kanıtlayacağım. Bir dakika..."

"Bilmiyorum"a Karşılık "Bilemiyorum": Yerel Gizli Değişkenler

Bohr'un EPR argümanına verdiği ilk yanıt aceleye gelmişti ve neredeyse hiç anlaşılmıyordu.[4] Bu argümanı daha sonra geliştirip inceltti: Fakat Einstein'la girdiği diğer bütün tartışmalarda yaptığı gibi ikna edici bir yarı klasik argüman çıkarmayı başaramadı. Bunun sebebi basitti: Böyle bir argüman yoktu. Kuantum mekaniği "yerel olmayan" (nonlocal) bir kuramdır; bu da çok uzun mesafelerle ayrılmış ölçümlerin birbirlerini klasik fiziğin mümkün görmeyeceği biçimlerde etkileyebileceği anlamına gelir.

Einstein, Podolsky ve Rosen'ın tercih ettiği kurama, modeli oluşturan temel varsayımlardan hareketle yerel gizli değişken kuramı denir. "Gizli değişken" ölçülebilen bütün niceliklerin kesin değerleri olduğu; ama bu değerlerin deneyi yapan insanlarca bilinmediği anlamına gelir. "Yerel" uzayın bir noktasındaki ölçümler ve etkileşimlerin, ancak o noktanın yakın çevresindeki şeyleri anında etkileyebileceği anlamına gelir. Uzun mesafeli etkileşimler mümkündür; ama bu etkileşimlerin biraz zaman alması ve ışık hızına yakın ya da ondan biraz daha az bir hızla diğer tarafa iletilmesi gerekir.[5]

Yerellik klasik fizik açısından o kadar merkezi bir önemdedir ki karşı çıkılamayacak kadar aşikârmış gibi görünebilir. Ye-

---

4- Bohr, biraz kapalı yazım tarzıyla meşhurdu; ama bu örnekte kendi kendisini aşmıştı. Makalesinin kritik önemdeki paragrafında, uzak nesneler arasındaki kuantum ilişkisinden "*sistemin gelecekteki davranışıyla ilgili olası tahmin tiplerini belirleyen koşullar üzerindeki bir etki*" (italikler metnin orijinalindedir) diye bahsetmiş, kuantum bakış açısının "ölçüme dair bütün muğlak yorum olasılıklarının, kuantum kuramının nesneleri ve ölçüm aygıtları arasındaki sonlu ve kontrol edilemez etkileşime uygun bir biçimde, akılcı olarak kullanılması olarak nitelenebileceği"ni söylemişti.

5- Bu ışık hızı sınırı, Einstein'ın görelilik kuramının başlıca sonuçlarından biridir; bu yüzden de onun fizik kavrayışı açısından

rellik, nedenler ve sonuçlar arasında bir süre geçmesi gerektiğini söyler. Bir insan bahçedeki bir köpeği çağırdığında, çağrı sesinin ona ulaşması için gereken zaman geçinceye kadar köpek koşup gelmeyecektir.[6] O zamandan önce insanın yaptığı hiçbir şey köpeğin eylemlerini etkileyemez.

EPR argümanını bir paradoks haline getiren şey yerelliktir. Önerilen deneyde hiçbir şey iki ölçüm arasındaki zamanı sınırlamaz. A parçacığını Princeton'da tutup B parçacığını Kopenhag'a gönderebilir; A'nın konumunu, B'nin momentumunu, diyelim ki Doğu Standart Saati'ne göre öğleyin 12'yi bir nanosaniye geçe ölçmekte anlaşabilirsiniz. Princeton'dan Kopenhag'a ikinci ölçümün sonucunu etkileyecek sürede bir haber uçmasının imkânı yoktur. Bu yüzden, yerelliği varsaymak doğrudur; iki ölçüm birbirinden tamamen bağımsızdır; her biri temeldeki bir gerçekliği yansıtmalıdır.

Yerellik varsayımı ne kadar aşikâr görünürse görünsün, argümanın beyhude olduğu nokta tam da budur. Kuantum mekaniği yerel olmayan bir kuramdır; dolanık iki nesneden biri üzerinde yapılan bir ölçüm diğeri üzerindeki ölçümleri birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar anında etkileyecektir. Ölçülen nesnelerin dolanık olması koşuluyla Princeton'da A'nın ölçülmesi, Kopenhag'daki ölçümün sonucunu belirleyecektir.

Kuantum mekaniği yerel olmadığından, iki dolanık parçacığın durumu ikisinden biri ölçülünceye kadar belirsiz kalır. Parçacıkların durumunu bilmemek şöyle dursun, bu zaten *bilinemezdir*. Köpek örneğimizle bakalım: Biri iki köpekten birinin durumunu ölçünceye kadar iki köpek de aynı anda hem uyanık hem uykudadır; sistemin dalga fonksiyonunun "Truman uyanık, RD uyanık"a denk gelen bir kısmı ve "Truman uyuyor, RD uyuyor"a denk gelen bir kısmı vardır; ama köpeklerin hiçbiri de kesin ola-

---

6- Çağrıldığında ne yaptığına bağlı olarak daha uzun bir süre bile geçebilir.

rak uyanık ya da uykuda değildir. Köpekler Schrödinger'in kedisinin daha dostane bir versiyonu olarak bir süperpozisyon durumunda var olurlar.

Bir köpeğin durumu ancak ölçüldüğünde kesin bir değer alır; bu olduğunda da eş zamanlı olarak diğer köpeğin durumu belirlenir. Birini ölçtüğünüz anda, birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar, ikisinin de durumunu belirlersiniz. Truman uyanıksa RD de uyanıktır; Truman uyuyorsa RD de uyuyordur. Durumlarını ölçmeden önce ikisini farklı odalara koyarsanız Truman'ın durumunu ölçmenin RD'yi doğrudan etkilememesine, aralarında hiçbir bilgi akışı olmamasına rağmen birbirleriyle ilişkili olduklarını görürsünüz. Birbirinden ayrılmış iki köpek tek bir kuantum sistemidir ve bu sistemin herhangi bir parçasını ölçmek sistemin tamamını etkiler.

Yerel olmamak (nonlocality) EPR deneyinin, belirsizlik ilkesini aşmasını engeller. A parçacığının ölçülmesi, sanki B parçacığı ölçülmüş gibi B parçacığının durumunu bozar. İki parçacık ölçüm öncesinde birbirinden ne kadar titiz ayrılmış olurlarsa olsunlar bu geçerlidir; dolanık parçacıklar yerel olmayan, tek bir kuantum sistemidirler.

Yerel olmamak, klasik bilimin temeline, üçüncü ve dördüncü bölümlerde tartıştığımız olasılık ve ölçüm meseleleri kadar sağlam ve rahatsız edici felsefi bir meydan okumada bulunur. Dolanık nesnelerin anında kesin durumlara geçmesi, kuantum kuramının bizi varmaya zorladığı bir sonuçtur; klasik mekanikte böyle bir şey yoktur.[7]

EPR makalesiyle birlikte kuantum mekaniği bir çıkmaza gir-

7- Kopenhag yorumunu kabul ederseniz bu geçiş dalga fonksiyonunun tek bir hale çökmesini gerektirir. Çok dünyalı yorumunu tercih ederseniz tek hale geçiş, dalga fonksiyonunun tek bir dalını algılayabildiğimiz için ortaya çıkar. Her iki durumda da ortaya çıkan korelasyon aynıdır ve sonuç anında gerçekleşir.

di. Bohr'un ortodoks kuantum kuramını destekleyenler EPR argümanına ikna olmamışlardı; ama zorlayıcı bir karşı argüman ileri süremiyorlardı. Bu arada Einstein gibi kuantum kuramının açılımlarından rahatsız olan insanlar EPR kuramını, bu tuhaf ve nahoş kuantum meselesini anlamayı sağlayacak daha derin bir kuram ileri sürüyormuş gibi gösteriyordu. Bohr'un tarafını tutanların sayısı Einstein'ın tarafını tutanlardan fazlaydı; çünkü kuantum kuramı atomik özelliklere dair çok doğru tahminlerde bulunuyordu; ama tarafların hiçbiri belirleyici bir deney bulamıyordu.

Tartışma Son Buluyor: Bell'in Kuramı

Bu açmaz, İrlandalı fizikçi John Bell kuantum kuramının tahminleriyle Einstein'ın ileri sürdüğü yerel gizli değişken modelinin tahminlerini birbirinden ayırmanın bir yolunu buluncaya dek yaklaşık 30 yıl sürdü. Bell, yerel gizli değişken kuramlarında kesin parçacık durumları ve sadece yerel etkileşimler olduğunu; bu yüzden de bu kuramların, kuantum kuramının sınırlı olmadığı biçimlerde sınırlı olduğunu fark etmişti. Dolanık kuantum parçacıklarının durumlarının, mümkün hiçbir yerel gizli değişken kuramının karşılayamamayacağı şekilde korelasyon içinde olacağını söyleyerek bir matematiksel kuramı kanıtlamıştı. Bu korelasyonlar deneysel olarak ölçülebiliyordu; yerel gizli değişken sınırlarının ötesine geçen korelasyonları gösteren bir deney Bohr'un haklı olduğunu, Einstein'ın yanıldığını kesinlikle kanıtlayacaktı.

Bell'in kuramı modern kuantum mekaniği kavrayışına eleştirel yaklaşır; bu yüzden de biraz ayrıntılı açıklamaya değer. Köpeklerle gösterilemez; ama üçüncü bölümde bahsettiğimiz polarize atomlarla gösterilmesi çok zor değildir. Daha açık olalım: Polarizasyonları aynı iki foton düşünelim; birinin yatay olduğu öl-

çülürse, öbürü de yatay; birinin açısı 45 dereceyse, öbürünün açısı da 45 derece. Sonra olası üç farklı ölçüme bakalım.

Geleneksel düzenlemede iki deneyci vardır; biri "Alice", diğeri "Bob"dur; ama biz "Truman" ve "RD"ye sadık kalacağız, iyi köpekler onlar; deneycilerin her birine bir foton düşer. Truman'a da RD'ye de bir polarize edici ve bir foton detektörü verilir; bu aygıtlar bir araya getirildiklerinde fotonun polarize ediciden geçip geçmemesine bağlı olarak "1" ya da "0" diye kayıt düşen detektörler oluştururlar. Örneğin polarize edici dikey yerleştirildiyse dikey olarak polarize edilmiş bir foton bu aygıttan geçecek ve "1" verecektir; yatay olarak polarize edilmiş fotonsa geçemeyecek ve "0" verecektir. Polarize edici 45 derece dikey yerleştirildiyse dikey olarak polarize edilmiş bir fotonun bu aygıttan geçip "1" verme olasılığı yüzde 50'dir, yoksa engellenecek ve "0" verecektir.

Bu deney basittir: Köpeklerin her biri kendi polarize edicisini a, b veya c açılarından birine yerleştirir. Sonra bir foton için detektörün okuduğu değeri (1 ya da 0) yazar. Sonra köpekler detektörlerinin konumunu değiştirir ve bunu yine yaparlar. Bunu defalarca tekrarladıktan sonra, olası bütün detektör yerleştirme kombinasyonlarını birçok kere denemiş olacaklardır; sonra da vardıkları sonuçları karşılaştırırlar.

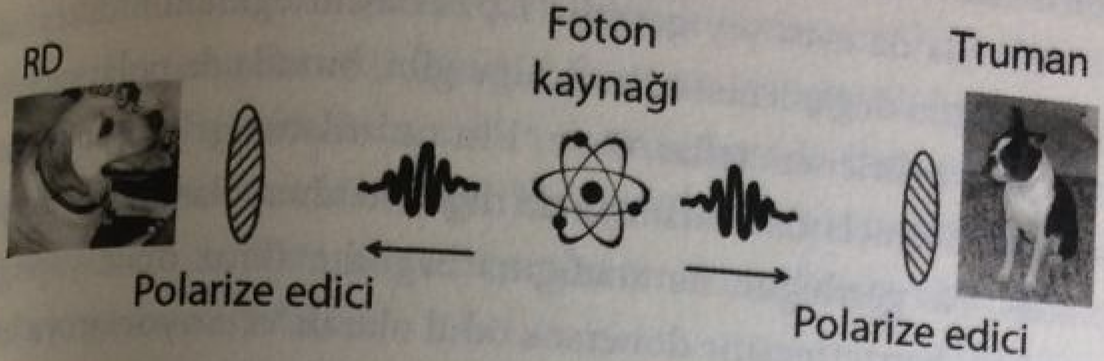
Sonuçları karşılaştırınca iki şeyin farkına varırlar. Polarize edicileri aynı açıyla kurulduğunda ikisinin de her seferinde aynı cevabı (1 ya da 0) aldığını görürler. Ayrıca hangi açıyı tercih ederlerse etsinler eşit sayıda "0" ya da "1" sonucu aldıklarını görürler. Deneyi belli bir açıda 1000 kere tekrarlarlarsa 500 "0", 500 de "1" elde edeceklerdir. Bir kuantum dolanıklığı durumla da uğraşıyor olsalar, yerel gizli değişken kuramının hükmündeki bir durumla da uğraşıyor olsalar bu iki gözlem geçerlidir.

"Bir dakika, bir dakika. Bu açılara bağlı değil mi?"

"Hangi açılara?"

"Şu a, b ve c açılarına. Neden eşit sayıda '0' ve '1' sonucuna va-

rıyorlar? Deney sonuçları hangi açıyı seçtiklerine bağlı değil mi? Polarize edicilerini dikey yerleştirirlerse örneğin, her zaman '1' sonucunu almazlar mı?"



Bell'in kuramını sınayan bir ölçümün şeması. Truman ve RD bir dolanık foton kaynağından birer foton alırlar; sonra polarize edici bir filtre ve detektör kullanarak üç ayrı açıda fotonlarının polarizasyonunu ölçerler. Polarize edicileri farklı açılarda olduğunda hangi sıklıkla aynı sonucu ölçtüklerine bakarak kuantum mekaniği ile yerel gizli değişken kuramı arasında bir ayrıma gidebilirler.

"Hayır, burada uğraştığımız durumlar belirsiz polarizasyon durumları. Kuantum tablosunda polarizasyon belirsizdir; yerel gizli değişken tablosundaysa yatay ya da dikey olması aynı ölçüde olasıdır."

"İyi de bu 45 derece açıda oldukları anlamına gelmez mi? Bu durumda polarize edicilerini 45 derece açıyla yerleştirirlerse her seferinde '1' sonucunu almazlar mı?"

"Hayır, 45 derecede ikisi de aynı sonucu alır. Fotonların dikey saat yönünün tersine 45 derece açıda, saat yönünde 45 derece açıda ya da başka bir açıda bulunması eşit derecede olasıdır. Hangi açıyı seçtikleri, a mı b mi c mi gerçekten hiç fark etmez. Şu 'dikey' ve 'yatay' bile biraz keyfidir."

"Hayır değil."

"Evet öyle. Sana tuhaf bir şey söylediğimde, sen de şimdi yap-

tığın gibi bana yan yan baktığında, 'dikey'in nasıl göründüğü değişir, öyle değil mi?"

"Sanırım. Bir açıdan her şey farklı görünür; bazen insanların tuhaf lafları daha anlamlı geliyor."

"Burada da aynı şey geçerli. Tıpkı başını eğmenin 'dikey' ve 'yatay' algını değiştirmesinde olduğu gibi, burada da polarize ediciler için belirlenen açılar '0' ve '1'in ne anlama geleceğini belirleyecek. Sonuçlardan birini ya da diğerini alma olasılığı yine eşit olacak. Ne gördüğün ne aradığına bağlıdır. Biraz önce yaptığımız ödül benzetmesine dönersek ödül olarak 'et' arıyorsan ya biftek ya tavuk alırsın; ama 'et olmayan' arıyorsan fıstık ezmesi ya da peynir."

"Ooo! Bu ödüller kulağa harika geliyor. Bana biraz bunlardan almalısın."

"Evcil hayvan mağazasında olduğunu sanmıyorum, ama bakarım."

Bell'in kuramını sınamak için deneyi yapanların *farklı* kurulmuş detektörlerle hangi sıklıkta *aynı* cevabı aldığını sorarız. Başka bir deyişle, Truman, detektörü a'dayken kaç kere "0" almıştır, RD c'de kaç "0" almıştır, Truman b'de kaç tane "1" almıştır, RD a'da kaç tane "1" almıştır vs.? Her iki köpeğin de farklı detektör kurulumlarında aynı sonucu alması, yerel gizli değişken kuramlarında ve kuantum mekaniğinde birbirinden çok farklıdır.

EPR Seçeneği: Yerel Gizli Değişken Tahmini

Bell'in kuramının kilit noktası, yerel gizli değişken kuramındaki bütün tahminlerin önceden yazılabilecek olmasıdır; hadi, bunu yapalım. İki fotondan her birinin durumu iyi tanımlıdır; biz bu durumu, polarize edicinin a, b, c konumlarında bulunduğu ölçümlerin kesin sonuçlarına verilen üç rakamla gösterebiliriz. İki fotonlu sistem, toplam sekiz olası durum verir. Bunları bir tabloda şöyle gösterebiliriz:

	Truman			RD		
Hal	a	b	c	a	b	c
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	1	1	0	1
4	1	0	0	1	0	0
5	0	1	1	0	1	1
6	0	1	0	0	1	0
7	0	0	1	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0

Bell'in kuramını sınamak için her iki köpeğin de farklı detektör kurulumlarında aynı cevabı alma olasılığına bakmamız gerek. Tabloya baktığımızda hangi açıyı seçersek seçelim sekiz olası halden dördünün aynı cevabı verdiğini görürüz. Örneğin Truman detektörünü a konumuna, RD de b'ye getirirse 1 ve 2. durumlarda ikisi de "1" sonucunu alacaktır; 7 ve 8. durumlarda da "0" sonucunu alacaklardır. Truman c'yi, RD a'yı seçerse aynı cevabı veren dört durum 1, 3, 6 ve 8. durumlar olacaktır.

Fakat farklı kurulumlarda aynı cevabı alma konusunda yüzde 50 olasılığa çakılıp kalmış değiliz. Fotonların belli bir durumda bulunması olasılığını değiştirmekte, örneğin 1. durumu daha olası ya da 6. durumu daha az olası kılmakta serbestiz; fakat yaptığımız her değişiklik her detektör kurulumunda "0" ya da "1" sonucuna varmayı aynı derecede olası kılacak.

Tek tek durumların olasılıklarıyla oynarsak sınırlı bir yelpazedeki olası durumları kapsadığımızı görürüz. Her iki köpeğin aynı sonuca varma olasılığını azami yüzde 100 yapabiliriz, ama asgari olasılık yüzde 0 değil, yüzde 33'tür. Ne yaparsak yapalım olasılığı yüzde 33'ten az yapamayız.[8]

Dikkatinizi çektiyse bu durumlara neyin yol açtığına ya da bu durumların nasıl seçildiğine dair hiçbir şey söylemedik. Söylememiz de gerekmiyor; sınırlı sayıda olası sonucu yazabilecek olmamız deneye sınırlamalar getiriyor. İki fotonun kaynaktan ayrıldıklarında iyi tanımlanmış durumlarda olduğu modellerin hiçbirinde, iki ölçümün aynı sonucu vermesi olasılığı yüzde 33'ten az olmaz. Olasılığın yüzde 100'den az ya da ona eşit, yüzde 33'ten fazla ya da ona eşit olması gerekir.[9] Aynı sınırlar hayal edebileceğiniz bütün yerel gizli değişken kuramları için geçerlidir.

8- Sistemin 1. halde olma olasılığı yüzde 50, 8. halde olma olasılığı yüzde 50 olursa, azami yüzde 100 değerini alırız. Asgari yüzde 33 olasılığa, sistemin 1. ya da 8. halde olmasına hiç izin vermeyip diğer altı hali eşit ölçüde olası kıldığımızda ulaşırız. 2,'den 7.'ye kadar hallere bakarsanız hangi farklı açıyı seçerseniz seçin her iki detektör için de aynı cevabı verecek her zaman iki hal olduğunu görürsünüz.

9- Bunun bir sonucu Bell'in kuramına dayalı öngörülere genellikle "Bell eşitsizlikleri" denmesidir.

Bohr Seçeneği: Kuantum Mekaniğine Dayalı Tahminler

O halde kuantum mekaniğinin doğru olduğunu kanıtlamak için iki köpeğin de farklı detektör kurulumlarıyla aynı cevabı alma olasılığının yüzde 33'ten az olduğu bazı detektör açıları bulmamız gerekiyor. Bell, dolanıklık sayesinde bunun yapılabileceğini göstermiştir: İki fotondan birinin polarizasyonunu ölçmek, diğerinin polarizasyonunu anında belirler.

Kuantum tablosunda, iki fotonun halleri, ölçüm sonucunun "0" ya da "1" olması olasılığının yüzde 50 olduğu, ikisinden birinin ölçüldüğü ana kadar belirsizdir. O ölçüm anında, ikinci fotonun polarizasyonu, birincinin açısına, artık o açı her neyse ona ayarlanmış olur. Birinci foton dikey bir polarize ediciden geçiyor, "1" sonucunu veriyorsa ikinci foton da artık dikey olarak polarize olmuştur. Birinci foton dikey polarize edicide engellenmiş, "0" sonucunu vermişse ikinci foton da artık yatay polarize olmuştur. O halde ikinci ölçümün olası sonuçları, birinci polarize edicinin açısıyla belirlenir.

Bell'in kuramını kanıtlamak için Truman'ın detektörünü dikey polarizasyona ayarladığını (buna a diyeceğiz), RD'nin de detektörünü ya saat yönünde 60 derece dikeye (b) ya da saat yönünün tersine 60 derece dikeye ayarladığını düşünelim. Polarize edici ayarları farklıysa iki köpeğin aynı cevapları alması hangi biçimlerde mümkün olabilir?

Sürenin yarısında, Truman detektörüyle "1" tespit edecektir; bu, RD'nin de "1" sonucunu alması anlamına gelir.[10] Truman'ın polarize edicisi dikey olursa RD'nin detektörüne çarpan dolanık foton da dikey olarak polarize olmuş demektir. RD'nin detektörü

10- Açıklık adına önce Truman'ın fotonunun ölçüldüğü varsayımında bulunuyoruz. İlk ölçülenin RD'nin fotonu olduğunu varsayarsak da sonuç aynı olur.

b konumundaysa, bu durumda dikey foton ile polarize edici arasındaki açı 60 derecedir ve fotonun aygıttan geçme olasılığı yüzde 25'tir. Aynı şey a konumuna diğer yönde 60 derece açıda bulunan c konumu için de geçerlidir.

Sürenin diğer yarısında Truman "0" ölçecektir; dolanık fotonların ikisi de yatay polarizedir. RD'nin fotonunun açıların ya birinde ya diğerinde engellenip "0" sonucu vermesi olasılığı yine yüzde 25'tir.[11]

O halde, Truman hangi değeri ölçerse ölçsün kuantum kuramı, RD'nin farklı bir polarize edici konumuyla aynı değeri elde etmesi olasılığının sadece yüzde 25 olduğunu söylemektedir. Bu sonuç, yerel gizli değişken kuramının tahminiyle doğrudan çelişir; bu kuram asgari olasılığın yüzde 33 olduğunu söylüyordu. Kuantum kuramının tahminlerine göre RD'nin dört ölçümünden sadece biri Truman'ın ölçümüyle aynıdır; yerel gizli değişken kuramıysa RD'nin üç ölçümünden *en az* birinin Truman'ın ölçümüyle aynı olması gerektiğini söyler.

İki kuramın aynı sonuçları vermesi gerektiğini; çünkü aynı sistemi, kuantum mekaniğinin farklı yorumlarının hepsinin de aynı tahminleri vereceği şekilde betimlediğini düşünebilirsiniz. Bell aksini gösterene kadar fizikçilerin çoğu böyle düşünüyordu. Yerel gizli değişkenler kuramlarının kilit varsayımları, bu kuramların katı sınırlamalara tabi olduğu anlamına gelir; yukarıdaki tablo gibi bütün olası sonuçları gösteren bir tablo hazırlayabilirsiniz. Kuantum kuramlarında aynı sınırlamalar yoktur; bu yüzden de akıllıca bir deney, bu iki tip kuramı birbirinden ayırabilir.[12]

11- Yatay fotonun polarize ediciden, iki konumdan birinde ya da diğerinde bulunan detektöre geçmesi olasılığı yüzde 75'tir. Truman'ın sonucuyla uyuşacak "0" değeri, ancak RD'nin fotonu engellenirse elde edilebilir, o da yüzde 25 olasıdır.

12- Bu durum yeterince akıllıca bir deneyin diyelim Kopenhag yorumu ile çoğul dünyalar yorumunu birbirinden ayırıp ayıramayacağı yönünde so-

Sonuçlar farklıdır çünkü kuantum mekaniği yerel değildir [nonlocal]; RD'nin fotonlarının polarizasyonu önceden belirlenmez, Truman'ın yaptığı ölçümün sonucuyla belirlenir. Farklı aygıt kurulumlarıyla aynı sonucu alma olasılığı düşüktür; çünkü iki ölçüm birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar, ne zaman yapılmış olurlarsa olsunlar birbirlerini etkilerler. Einstein buna "tekinsiz" demişti; onunla bunu tartışmak zordu.

"Daha iyi bir kuram oluşturamıyor musunuz?"

"Nasıl daha iyi bir kuram?"

"Daha iyi bir gizli değişken kuramı. Tahminlere daha iyi uyan bir kuram."

"Bütün mesele de bu zaten. Bell *belli* bir kurama bakmamıştı; onun gösterdiği şey, kuantum mekaniğinin bütün tahminlerini yeniden üretecek *olası bir gizli değişken kuramı olmadığıydı*. İki ölçüm birbirinden bağımsızsa, işleri, ölçümlerin kuantum mekaniğinde gördüğün korelasyonun aynısını göstermesini sağlayacak şekilde düzenlemenin bir yolu yoktur."

"Ölçümlerin birbirine bağlı olmasını sağlayın o zaman."

"Bu işe yarıyor; ama o zaman da *yerel* gizli değişken kuramı olmaktan çıkıyor. Aslına bakarsan David Bohm, yerel olmayan gizli değişkenlerin kullanıldığı; konumu, yönlü hızı belli parçacıklardan yararlanarak kuantum kuramının bütün tahminlerinin yeniden üretildiği bir kuantum mekaniği versiyonu üzerinde çalıştı."

"Bak bu kulağa hoş geliyor. Neden insanlar bundan yararlanmıyor?"

"Bohm'un kuramı işin içine fazladan bir 'kuantum potansiyeli' sokuyor; bütün evrene yayılan ve deneyin herhangi bir özelli-

---

rular doğurabilir. Bu, kuantum kuramı ile yerel gizli değişken kuramlarını birbirinden ayırmaktan çok daha zor bir problemdir. Gelecekte bir John Bell çıkıp doğru sınama yöntemini bulabilir; ama şimdiye kadar bunu başarmış kimse yoktur.

ğini değiştirdiğinde anında değişen bir fonksiyon bu. Gerçekten de tuhaf bir nane, hesaplama yaparken insanın başını ağrıtıyor. Kuantum alan kuramı diye bilinen kuram çerçevesinde, olağan kuantum mekaniğini görelilikle uyumlu olacak şekilde genişletmek daha kolay."

"Ama yanlış değil, ha?"

"Hayır, olağan kuantum kuramıyla aynı tahminlerde bulunuyor. Bunu, daha önce bahsettiğimiz Kopenhag yorumu ya da çoğul dünyalar yorumu gibi bir kuantum kuramı yorumunun aşırı bir versiyonu olarak görebilirsin. Kurama biraz daha matematik ekliyor; ama pratik anlamda farklı bir şey tahmin etmiyor."

"Hmm."

"Bu tartışma açısından önemli olan şey, Bohm'un kuramının yerel olmaması; EPR paradoksu ve Bell'in kuramı yerel olmamakla ilgili. Bunlardan, kuantum kuramının, iki farklı yerdeki ölçümlerin birbirini hiç etkilemeyeceği katı bir yerel kuram olamayacağını biliyoruz."

"Bu içime bir kurt düşürdü. Hangisinin gerçekten doğru olduğunu nereden biliyoruz?"

"Bunu sorduğuna sevindim."

Bu örnek özellikle Bell'in kuramını gösterir, ama genel kuramın havasını da yakalar. Bell'in gösterdiği şey, genel olarak yerel gizli değişken kuramlarıyla ulaşılabilecek şeyin sınırları olduğu; belli koşullar altında kuantum mekaniğinin bu sınırları aşacağıydı. Akıllıca bir deney, kuantum deneyinin mi haklı olduğunu yoksa Einstein'ın umduğu gibi onun yerini bir yerel gizli değişken kuramının mı alacağını kesin olarak belirleyebilir.

Laboratuvar Deneyleri ve İlmekler: Aspect Deneyleri

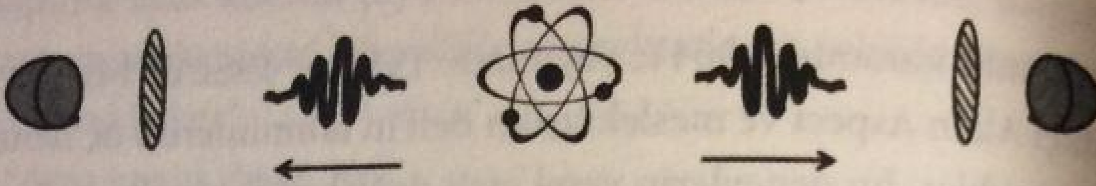
Bell ünlü kuramını 1964'te yayınladı. 1981 ve 1982'de Fransız fizikçi Alain Aspect ve meslektaşları Bell'in tahminlerini üç deneyle sınadılar; bu deneylerin yerel gizli değişken kuramlarını kesin olarak devre dışı bıraktığı genel kabul görmektedir.[13] Bir dizi "ilmeği"; vardıkları sonuçlarda bazı yerel gizli değişken modellerinin geçebileceği açıkları kapatmak için bu üç deneye gerek vardı.

Burada bu üç deneyi anlatacağız; çünkü deneysel fizik sanatının dikkat çekici örnekleridir. Fakat bunun da ötesinde fizikçileri bir şeye ikna etmek istiyorsanız nereye kadar gitmeniz gerektiğini gösterirler. Sırf bariz itirazları değil, biraz saçma görünebilecek olasılık dışı itirazları da cevaplamanız gerekir.

1981'de yayınlanan ilk deney, esasen Truman ve RD ile yaptığımız düşünce deneyinin aynısıydı. Aspect'nin grubu kalsiyum atomlarının birkaç nanosaniye farkla, ters yönlere giden iki atom salmasını sağladı. Bu fotonların aynı polarizasyona sahip olması garantiydi; ya yatay ya dikey olmaları (ya da başka iki açının birinde ya da diğerinde olmaları) aynı derecede olasıydı; ama fotonlardan biri yataysa diğerinin de yatay olması gerekiyordu. Bu tam da Bell'in kuramını sınamak için gereksindiğiniz dolanıklık halidir.

İlk deneyde dolanık foton kaynağının birbirine karşıt iki yanına iki detektör yerleştirdiler; her detektörün önünde bir polarize edici bulunuyordu. Polarize ediciler farklı açılara ayarlanmışlardı ve bir fotonun her iki detektörde birden kaç kere tespit edildiğini; yani yukarıdaki örneğimiz bağlamında her iki detektörün aynı seferde "1" sonucunu kaç kere verdiğini ölçüyorlardı.

13- John Clauser ve başka birkaç kişi daha önce bazı testler yapmıştı; fakat Aspect (As-pee diye okunur) deneyleri daha kesin sonuçlar veriyordu, bu yüzden de belirleyici testler olarak görüldüler.



İlk Aspect deneyi. Hareketlendirilmiş bir kalsiyum atomu polarizasyonları dolanık iki foton salar. Fotonların her biri önünde uygun bir açıyla yerleştirilmiş, polarize edici bir filtrenin bulunduğu bir detektöre doğru gider.

Fizikçiler sayılarla uğraşmayı severler; kullandıkları bu özel konfigürasyon için geliştirilmiş yerel bir gizli değişken modeli, vardıkları sonuçların -1 ile 0 arasında bir sayıya çıkacağı tahmininde bulunuyordu. Deneyi yaptıklarında 0,126 gibi bir değer ölçtüler; artı-eksi 0,014 gibi bir belirsizlik payı vardı.[14] Maksimum yerel gizli değişken değeriyle ölçümleri arasındaki fark, ölçümün belirsizlik payından dokuz kat daha büyüktü; bu da bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığının 10^{36}'da bir olduğu anlamına geliyordu.[15]

O halde bu, yerel gizli değişken kuramlarının sonu anlamına geliyordu, öyle değil mi? Tıpkı yukarıda yaptığımız hayali deneydeki gibi bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığı inanılmaz derecede düşüktür. Peki, o zaman bırakın üçüncüyü neden ikinci bir deney yapmaya gerek duydular?

Maalesef vardıkları sonuçta, bazı yerel gizli değişken kuram-

14- Bu belirsizlik, deneyin ayrıntılarına dayanan teknik bir sınırlamadan kaynaklanır, Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle hiçbir ilgisi yoktur.

15- 10^{36} bir milyar milyar milyar milyardır; o kadar büyük bir rakamdır ki Carl "milyarlarca milyarlarca" Sagan bunu söylerken arada gözlerini kırpabilirdi.

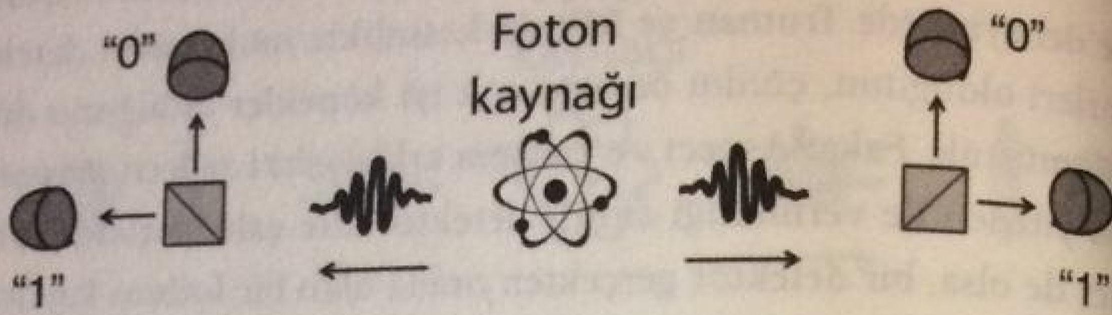
larının ayakta kalmasını mümkün kılacak bir açık vardır. Düşünce deneyimizde Truman ve RD'nin kesinlikle mükemmel detektörleri olduğunu, çünkü onların çok iyi köpekler olduğunu düşünmüştük. Fakat Aspect ve çalışma arkadaşları sadece insandı; bu yüzden de verimliliği sınırlı detektörlerle çalışıyorlardı. Ender de olsa, bir detektör gerçekten orada olan bir fotonu kaydetmeyebilir.

Bu bir sorundur; çünkü bir foton görmeyi bekleyip de görmediklerinde deneyleri "0" kaydediyordu; bu fotonların polarize ediciler tarafından engellendiğini varsayıyorlardı. Fakat bazen deneyleri foton tespit edemediğinden, ilk Aspect deneyinin yerel gizli değişken deneyini çiğniyormuş gibi *göründüğü de* düşünülebilir. Bu "0"ların bazılarının gerçekten "1" olmasının gerekmesi, sonuçlarda bir karışıklığa yol açabilirdi.

Yerel gizli değişken kuramlarının bu açığı kapatması için evrenin biraz ters olması gerekirdi; ama bu mümkündür; bu yüzden de her foton için iki detektör kullanarak iki deney yaptılar ve bu deney 1982'de yayınlandı.

Detektör verimliliği açığını, olası *her iki* polarizasyonu doğrudan tespit ederek ve yalnızca aygıtın her iki tarafında da bir foton tespit ettikleri deneyleri geçerli sayarak kapattılar. Polarize edicilerin yerine, her polarizasyonu kendi detektörüne yönlendiren polarize edici huzme ayırıcı koydular. Bu detektörlerden biri bir fotonu kaydedemezse deneyin o tekrarı sayılmıyordu.

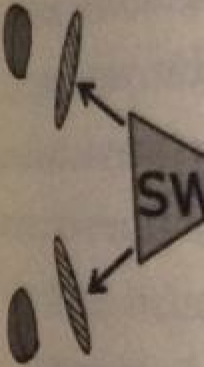
Ekibin ikinci ölçümde ölçtüğü değer, yerel gizli değişken sınırını belirsizlik payının 40 kat üstüne çıkarak aştı; bunun şans eseri gerçekleşmesi olasılığı saçma denecek kadar düşüktü. Peki, üçüncü deney neden yapıldı? İkinci deney ne kadar etkileyici olursa olsun bir açık bırakmıştı; bir şey detektörler ile foton kaynağı arasında mesaj iletmiş olabilirdi.



İkinci Aspect deneyi. Dolaşık fotonlar kaynaktan ayrılır ve önlerinde polarize edici bir huzme ayırıcının bulunduğu iki detektöre doğru yol alır. Bu huzme ayırıcılar "0" polarizasyonu bir detektöre, "1" polarizasyonu diğer detektöre yönlendirerek deneyde hiçbir fotonun kaybolmamasını sağlar.

Bell'in kuramının sınanabilmesi için, bir detektörde yapılan ölçümün diğer detektörde olup bitenlere dayanması, aralarında ışıktan daha hızlı bir etkileşim yoksa imkânsız olmalıdır. Detektörler arasında ışık hızından daha düşük hızlarda mesaj iletmenin bir yolu varsa bütün bahisler yatar. İlk iki deneyde, deney ekibi detektörlerin konumunu önceden belirlemiş ve onları ışığın foton kaynağı ile detektör arasındaki yolu aşması için gereken süreden daha uzun bir süre boyunca bu konumda bırakmışlardı. Bir şey polarize edicilerin konumunu detektörlerden kaynağa iletmiş, kaynak da kuantum tahminlerine uyacak şekilde seçilmiş kesin polarizasyon değerlerine sahip fotonlar göndermiş olabilirdi. Deneyi yapanlar açıları değiştirdiklerinde, kaynağa yeni değerler gönderilecek; bu da kaynağın gönderdiği fotonların polarizasyonlarını değiştirecekti. Varılan sonuçlar kuantum kuramını kanıtlıyormuş gibi *görünüyordu*; ama kozmik bir komploya kurban gitmiş olabilirlerdi.

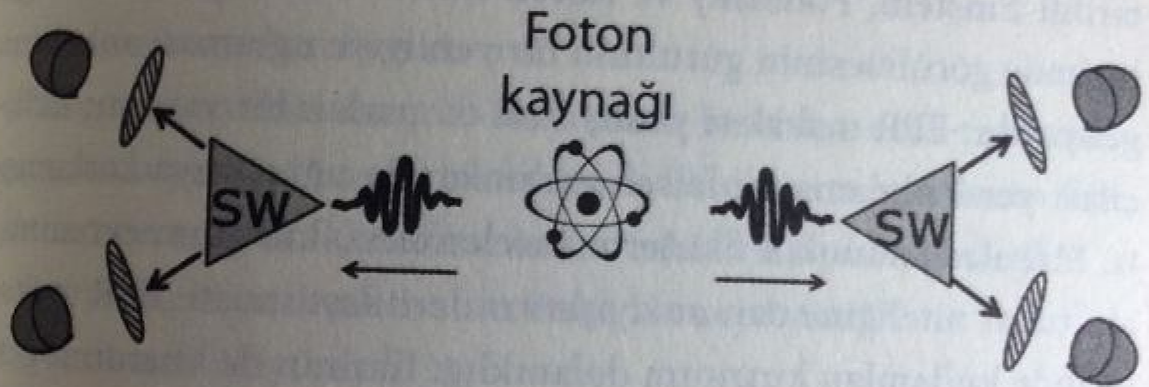
Üçüncü deneyde, bu açığı da kapamanın dahiyane bir yolu bulundu. Aspect ve meslektaşları, ışığın kaynaktan detektöre ulaşabileceğinden hızlı bir şekilde detektör konumlarını değiş-



tirerek kuantum sonuçlarını taklit eden bir tür kozmik komplo olasılığını devre dışı bıraktılar.

Huzme ayırıcıların yerine, fotonları, her biri farklı bir polarizasyona ayarlanmış iki detektörden birine yöneltebilecek hızlı optik anahtarlar koydular. Anahtarlar her 10 nanosaniyede bir detektör değiştiriyordu; fotonların detektöre ulaşması ise 40 nanosaniye alıyordu. Aslına bakarsanız bir fotonun hangi detektöre ulaşacağı, foton kaynaktan ayrıldıktan *sonra* belli oluyordu.

Üçüncü deneyin sonuçları yerel gizli değişken sınırını, belirsizlik payının beş katına çıkarak aştı. Böyle bir sonucun kazara gerçekleşmesi olasılığı yüz milyarda birdir; diğer iki deneydeki olasılıktan daha yüksektir, ama ikna edici olabilecek kadar düşüktür.



Üçüncü Aspect deneyi. Dolanık iki foton kaynaktan ayrılır ve hızlı optik anahtarlara doğru yol alır; anahtarlar fotonların her birini iki farklı polarize ediciden birine gönderir; bu tercih ancak foton kaynaktan ayrıldıktan sonra gerçekleşir.

Üçüncü deney bile bütün açıkları kapatmıyordu;[16] ama Aspect burada durdu; çünkü deneyler olağanüstü derecede zordu. Birkaç kişi daha modern dolanık foton kaynakları kullanarak bu

16- Aslında üçüncü deney detektör verimliliği açığını yeniden açar; çünkü polarize edicilerin her biri için bir detektör kullanılmıştır.

deneyleri tekrarladı;[17] 2008'de yapılan bir deneyde foton yerine dolanık iyonlar kullanılarak Bell'in kuramı sınandı; fakat açığın olmadığı bir test henüz gerçekleştirilmiş değildir. Sonuçta, yerel gizli değişken kuramlarının tam anlamıyla devre dışı bırakılmadığını savunan hâlâ birkaç kişi vardır.

Bu ölümüne katı birkaç kuramcı bir yana, fizikçilerin büyük çoğunluğu, Aspect ve ekibinin Bell kuramlarını sınamak için yaptığı deneylerin, kuantum mekaniğinin yerel olmadığını kesin bir biçimde gösterdiğinde hemfikirdir. Evrenimiz parçacıkların her zaman kesin özelliklere sahip olduğu, bir yerde yapılan ölçümlerin başka yerlerde yapılan ölçümlerle etkilenmediği bir kuramla betimlenemez.

Aspect'nin deneyleri, dünyanın, Einstein'ın savunduğu; 1935 tarihli Einstein, Podolsky ve Rosen imzalı makalede sunulduğu biçimde görülmesinin gürültülü bir yenilgiye uğraması anlamına geliyordu. EPR makalesi yanlış olsa da parlak bir yanlıştı; fizikçileri yerel olmamanın felsefi açılımlarıyla uğraşmaya zorlamıştı. Makalede sunulan fikirlerin incelenmesi, kuantum evrenimizin tuhaf niteliğine dair anlayışımızı derinleştirmişti. EPR makalesinde kullanılan kuantum dolanıklığı fikrinin de kuantum gerçekliğinin yerel olmayan niteliğini kullanarak inanılmaz şeyler yapmamızı mümkün kılacağı anlaşıldı.

"Fizikçiler gerçekten de tuhaf."

"Evet, yerel olmama tuhaftır."

"Yok o değil, şu açıklar. Fizikçiler aygıtın farklı kısımları arasında mesaj iletimi olduğuna gerçekten de inanıyor mu? Ne taşıyacak ki o mesajları?"

17- Paul Kwiat (beşinci bölümde bahsettiğimiz kuantum sorgulama deneylerini gerçekleştiren Innsbruck-Los Alamos ekibinde yer alıyordu) ve meslektaşlarının Los Alamos'ta yaptıkları bir deneyde, belirsizlik payından 100 kat daha büyük çıkarak insanın kafasını karıştıran bir etki görülmüştü.

"Akla yatkın bir mekanizma öneren biri çıktı mı bilmiyorum; ama bu aslında önemli değil. Görünmez kuantum tavşancıkları taşıyabilirdi, ne kadar farklı olurlarsa olsunlar."

"Kuantum tavşancıkları mı?"

"Görünmez kuantum tavşancıkları. Işık hızında hareket ediyorlar. Fazla umutlanma."

"Ooo!"

"Her neyse üçüncü Aspect deneyi, aygıtın kısımları arasında tavşanlar olsun, başka şeyler olsun mesaj taşıyacak araçları büyük ölçüde devre dışı bırakır. Mesele şu ki bundan önce başka bir açıklamanın olması prensipte mümkündü. Bilimde, birini olağandışı bir iddiaya ikna etmek istiyorsan olası bütün açıklamaları, hatta gerçekten olasılık dışı görünen açıklamaları bile devre dışı bırakman gerekir."

"Tavşanlı açıklamaları da mı?"

"Tavşanlı açıklamaları da. Hem zaten birbirine uzak parçacıklar arasında yerel olmayan bir biçimde korelasyon kurulması fikri, kuantum tavşancıkları fikri kadar tuhaf bir açıklama değil."

"İyi noktaya parmak bastın. Peki, bu neye yarar?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Son paragrafta, dolanıklığın bir şeylere yaradığı yolunda gerçekten de vurgulu cümleler sarf ettin. Neye yarıyor? Işıktan hızlı mesaj göndermeye mi?"

"Hayır, bunu ışıktan hızlı iletişim için kullanamazsın; çünkü tespitler rastgeledir. Parçacıklar arasında korelasyon vardır; ama her parçacık çiftinin korelasyonu rastgele olacaktır. Birine EPR korelasyonlarını kullanarak mesaj gönderemem; gönderebileceğim tek şey rastgele rakam dizileri olur."

"İyi de bu neye yarar?"

"Rastgele rakam dizileri kuantum kriptografisine, çözülemez şifreler oluşturmaya yarayabilir. Dolanıklık fikri, kuantum bilgisayarlarının temelindedir; kuantum bilgisayarları normal bir bil-

gisayarın çözemeyeceği problemleri halleder. Bir de dolanıklığı, durumları bir yerden diğerine aktarmak için kullanan kuantum teleportasyonu vardır. Envai çeşit iş var yani, ararsan bulursun."

"Ooo! Teleportasyon kulağa hoş geliyor! Ondan bahset!"

"Evet, bir sonraki konumuz o."

VIII

Bana Bir Tavşan Işınla: Kuantum Işınlaması



Emmy büroma giriyor, görünüşe bakılırsa kendinden memnun. Bu hiç de iyiye işaret değil.

"Bir planım var!" diye bağırıyor.

"Gerçekten mi? Nasıl bir planmış bu?"

"Şu sinir bozucu sincapları yakalamayı sağlayacak bir plan!" Sincaplar ondan kaçıp arka bahçedeki ağaçlara tırmanıp duruyor; o da hayal kırıklığı içinde.

"Kuş yemliğinden dökülen yemleri yiyerek uçmayı öğreneceğin plandan daha mı iyi bari?"

"İşe yarayacaktı o plan," diyor gururla. "Evet, bilmeni isterim ki ondan çok daha iyi bir plan."

"İyi o halde. Kulağım sende. Neymiş bakalım bu parlak plan?"

"Işınlama." Kendini beğenmiş görünüyor; zafer duygusuyla kuyruğunu sallıyor.

"Işınlama mı?"

"Aynen öyle."

"Peki, ama bunu biraz açman lazım."

"Bak, şöyle düşündüm: Sorun, benim evden geldiğimi görmeleri ve ağaçlara benden önce çıkmaları. Sincaplarla ağaçlar arası-

na girebilirsem, onları oraya varmadan yakalayabilirim."

"Peki, hâlâ dinliyorum."

"Bu yüzden de kapıdan geçmek yerine arka bahçeye ışınlanmam gerek." Şimdi bütün arka tarafı sallanıyor.

"Hı hı. Peki, bunu nasıl başarmayı düşünüyorsun acaba?"

"Ben..." Kuyruğu yavaşlıyor, o sevimli-zavallı görünümünün en iyisini takınıyor. "Ben bana yardım edersin diye ummuştum."

"Ben mi?"

"Evet. Bazı fizikçilerin kuantum ışınlamasını gerçekleştirdiklerini okudum. E, sen de fizikçisin, hem gerçekten de akıllısın, bir de kuantum biliyorsun. O yüzden de bir ışınlayıcı yapmama yardım edersin diye umdum." Başımı kucağıma koyuyor. "Lütfeeen! Ben iyi bir köpeğim."

Kulaklarının arkasını kaşıyorum. "İyi bir köpeksin, ama gerçekten de yardım edemem. Öncelikle laboratuarımda ışınlama deneyleri yapmıyorum. Ama yapsaydım bile sincapları yakalamak için ışınlamayı kullanmana yardım edemezdim."

"Nedenmiş o?"

"Mevcut ışınlama deneylerinin hepsi de tek tek parçacıklarla, genellikle fotonlarla uğraşıyor. Sen muhtemelen 10^{26}, yani yüz trilyon trilyon atomdan oluşuyorsun; şimdiye kadar teleporte edilmiş miktardan çok çok fazla."

"Evet, ama sen gerçekten de akıllısın. Biraz... Biraz daha büyüğünü yapıvereceksin işte."

"Bana duyduğun güvene teşekkür ederim, ama hayır. Asıl sorun şu ki insanların gerçek dünyada yaptığı ışınlama *Uzay Yolu*'nda gördüğün cihazlarla yapılan ışınlamaya benzemiyor."

"Neden peki?"

"Bak, kuantum ışınlamasının yaptığı tek şey bir parçacığın *durumunu* bir yerden diğerine aktarmak. Diyelim ki burada bir atomum var; onu arka bahçeye "ışınlayabilirim"; orada burada başladığım atomla aynı durumda bir atom olabilir. Ama bu sürecin

sonunda, başladığım yerde en baştaki atom hâlâ var olacaktır; o atom bir yerden diğerine gitmez."

"Bu çok ters. Ne anlamı var peki?"

"Bak, kuantum mekaniği, baştaki durumu değiştirmeksizin bir durumun eksiksiz bir kopyasını çıkarmanı sağlamaz; atom gibi şeylerin kuantum halleri çok kırılgandır. Bir kuantum durumunun bir yerden diğerine aktarılmasına ihtiyacın varsa, yapabileceğin en iyi şey onu ışınlamak olabilir." Biraz kuşkulu görünüyor. "Birbirlerine bağlanması gereken birkaç kuantum bilgisayarın varsa, kuantum ışınlamasını internetin kuantum versiyonunu yapmakta kullanabilirsin."

"Peki, anlaşıldı. O zaman benim durumumu arka bahçeye ışınla da ben de onu sincap yakalamakta kullanayım."

"Senin durumunu bir avuç fotonla nasıl dolanıklaştıracağımı bilseydim bile, ki bilmiyorum, arka bahçede hammaddeye gereksinimimiz olurdu. Orada tıpkı sana benzeyen başka bir köpek olması gerekirdi.

Kuyruğu duruyor. "O köpekleri sevmeyiz," diyor. "Tıpkı bana benzeyen köpekler. Benim bahçemde. O köpekleri hiç de sevmeyiz." Sıkılmış görünüyor.

"Hayır, sevmeyiz. Bize tüm gereken, senden bir tane." Biraz canlanıyor. "Görüyorsun işte, ışınlama iyi bir plan değil."

"Sanırım değil." Bir an sessiz duruyor ve düşünceli görünüyor. "Peki, o halde," diyor, "A planına geri döneriz."

"A planı mı?"

"Biraz kuş yemi alabilir miyim?"

"Kuantum ışınlanması" bir önceki bölümde tartıştığımız yerel olmayan korelasyonların en bilinen uygulamasıdır herhalde. Bu ismin hayal gücünü tetiklediği; *Uzay Yolu*'ndan, insanların ya kurgusal bilimle ya sırf büyüyle nesneleri bir yerde diğerine anında taşıyabildiği başka kurgulardan görüntüleri akla getirdiği ke-

sin. A noktasındaki nesne yumuşak bir "pof"la ortadan kaybolur ve uzaktaki B noktasında yeniden belirir.

Bilim-kurgunun yarattığı yüksek beklentiler, kuantum ışınlanması gerçekliğinin hayal kırıklığı gibi görünmesine yol açmaktadır. Gerçek kuantum ışınlaması sadece bir kuantum halinin bir yerden diğerine aktarılmasıyla ilgilidir; nesnelerin tamamen hareket ettirilmesiyle değil. Ayrıca bu transfer ışık hızından yavaştır; çünkü bilginin bir yerden diğerine gönderilmesi gerekir. Durumdan şüphelenmeyen yaratıkların bulunduğu yerlere kendilerini ışınlamayı uman köpekler için büyük hayal kırıklığıdır bu.

Yine de kuantum kuramının muhteşem derecede akıllıca bir kullanımıdır; daha önce bahsettiğimiz birkaç konuyu birbirine bağlar. Bu bölümde, kuantum ölçümü ve kararsızlığın, kuantum halleriyle ilgili bilginin bir yerden diğerine aktarılmasını nasıl zorlaştırdığını göreceğiz. "Kuantum ışınlanması" planının bu sorunlardan kaçınmak için yerel olmamayı (nonlocality) ve dolanık halleri nasıl dahiyane bir biçimde kullandığını; bu sorunlardan neden kaçınmak isteyebileceğinizi göreceğiz.

Kuantum ışınlanması karmaşık ve incelikli bir konudur; bu kitapta tartıştığımız konuların herhalde en zorudur. Ayrıca kuantum fiziğinin tuhaflığına ve gücüne verebileceğimiz en iyi örnektir.

Uzağa Kopyalama: Klasik "Işınlama"

Bilim kurguda ve fantazide hayal edildiği gibi ışınlanamayız; ama ışınlanmanın özü, uzağa kopyalamadır; bir yerdeki bir nesneyi alırsınız ve onun yerine başka yerdeki tam bir kopyasını geçirirsiniz. Bu tanımla yaklaştığımızda elimizde klasik fiziğin kullanıldığı yaklaşık bir ışınlanma vardır: Faks makinesi.

Bir yerden diğerine anında göndermek istediğiniz bir belge varsa; örneğin Truman gerçekten güzel bir kemik aldıysa ve onun bir fotoğrafını göndererek RD'ye hava atmak istiyorsa bunu faks makinesiyle yapabilirsiniz. Makine belgeyi tarar, onu benzer bir belge yaratmaya yönelik elektronik talimatlara çevirir ve bu bilgiyi telefon hattı üzerinden uzaktaki başka bir faks makinesine gönderir; o makine de bir kopyasını basar. Aktarılan, belgenin kendisi değil, o belgenin nasıl yapılacağı bilgisidir.

Faks makinesinin işleyişi kurgusal ışınlanma fikrinden farklıdır; ama bu farklılıklar o kadar da önemli değildir. Bir belgeyi bir yerden diğerine faksladığınızda farklı yerlerde iki kopya olur; ama bunu bir sorun olarak görüyorsanız gönderen faks makinesine orijinal belgeyi ortadan kaldıracak bir kağıt öğütücü ekleyebilirsiniz. Bir faks makinesinin ürettiği kopya mükemmel değildir; ama bu tarayıcının ve yazıcının çözünürlüğüyle ilgili bir meseledir; her zaman daha iyi bir tarayıcı ve yazıcı almayı düşünebilirsiniz. Aktarma işlemi, bilginin bir yerden diğerine aktarılması için geçen süreyle sınırlıdır; bu yüzden tam anında değildir; ama faks makinesinin kullanıldığı çoğu işlem için bu büyük bir sorun değildir.

Klasik bir dünyada kurgusal ışınlanma idealine yaklaşmak istiyorsanız yapabileceğiniz en iyi şey faks makinesi kavramının niteliklerini artırmak olur. Truman bir kemik alır, makineye yerleştirir; makine kemiği tarayıp onu oluşturan atomların ve moleküllerin düzenini belirler. Sonra bu bilgiyi RD'nin "ışınlanma" makinesine gönderir; o makine de eldeki malzemelerle benzer bir kemik yapar ve çiğnesin diye RD'ye sunar.

Klonlamaya İzin Yok: Kuantum Sınırlamaları

Kuantum ışınlanmasına dönelim: Bir kuantum nesnesinin "ışınlanmasından" bahsediyoruz. Bu, nesneyi oluşturan atomlar ve moleküllerin doğru fiziksel düzenlenmesini elde etmekle kalmayıp süperpozisyon durumları da dahil olmak üzere bütün bu parçacıkların kuantum durumlarını da doğru almak anlamına gelir. Truman RD'ye kutunun içinde bir kedi göndermek için nitelikleri artırılmış bir faks makinesi kullanabilir; fakat bir kutunun içinde yüzde 30 diri, yüzde 30 ölü, yüzde 40 kafayı yemiş bir kedi gönderecek bir kuantum ışınlama aygıtına gereksinimi vardır. Bunun, kuantum ölçümünün etkin niteliği yüzünden, klasik benzetmeden çok çok daha zor olduğu anlaşılmaktadır.

Kuramda herhangi bir nesneyle kuantum ışınlanmasını gerçekleştirmek mümkünse de pratikte bugüne kadar yapılan deneylerin hepsinde fotonlar kullanılmıştır; bu yüzden de Truman'ın RD'ye belli bir polarizasyonda tek bir foton göndermeye çalıştığını düşünebiliriz.[1] Üçüncü bölümde gördüğümüz üzere polarize edilmiş bir foton yatay ve dikey polarizasyonların bir süperpozisyonu olarak düşünülebilir; fotonun bu iki izinli durumdan birinde bulunma olasılığı vardır.

Polarizasyonu yatay ile dikey arasında bir fotonu tanımladığımızda, bu foton için bir süperpozisyon haline denk gelen bir dalga fonksiyonu yazarız: a kısmı dikey, b kısmı yataydır.

$$a|D> + b|Y>$$

a ve b rakamları bize, dikey ve yatay polarizasyonla karşılaşma olasılığını verir.[2] Aslına bakarsanız bir süperpozisyon duru-

1- Neden böyle tuhaf bir şey yapmak isteyebileceğini bu bölümün sonunda tartışacağız.

2- Daha kesin bir ifadeyle a^2 dikey polarizasyon bulma olasılığı, b^2 yatay

mundaki bir nesne, tam buna benzer bir dalga fonksiyonuyla tanımlanacaktır. Truman'dan RD'ye bir foton polarizasyonu göndermenin bir yolunu bulabilirsek aynı tekniği bir kutunun içindeki bir kedinin durumunu ışınlamak için de kullanabiliriz; bu sadece sürece dahil olan parçacık sayısının artması meselesidir.

Yani, Truman'ın elinde RD'ye göndermek istediği bir foton var. Klasik reçete ona fotonun polarizasyonunu ölçmesini, ardından RD'ye telefon açıp benzer bir durumu nasıl hazırlayacağını anlatmasını söyler. Ama Truman'ın polarizasyonu ölçebilmesi ancak fotonun durumuna ilişkin önceden bir şey bilmesi ve polarizasyon detektörünü buna göre kurması halinde mümkündür. Örneğin fotonun dikey ya da yatay polarize edildiğini biliyorsa fotonu dikey duran bir polarize ediciye gönderebilir. Foton geçerse polarizasyonun dikey, geçemezse yatay olduğunu bilecektir. Ondan sonra bu bilgiyi RD'ye gönderebilir; RD de uygun halde bir foton hazırlayabilir.

Maalesef polarizasyon ara bir açıda -*a* kısmı dikey, *b* kısmı yatay- gerçekleştiyse Truman'ın gerekli ölçümü yapması mümkün değildir. a ve b sayıları bize fotonun dikey ya da yatay polarize ediciden geçme olasılığını verir; ama *bir tek* foton için hem a'yı hem *b*'yi ölçmenin bir yolu yoktur; foton polarize ediciden ya geçer ya geçmez. Foton polarize ediciden geçse bile süperpozisyon bozulur ve foton izinli durumlardan birinde kalır.

Her iki olasılığı, aynı şekilde hazırlanmış fotonları kullanıp ölçümü birçok kere tekrarlayarak bulursunuz. Fakat bu, hedeflediğimiz üzere, *bir tek* fotonun polarizasyonunu aktarmamızı sağlamaz.

Bu polarizasyon ölçümü sorunu, kopyalanmama kuramına özgü bir örnektir. William Wootters ve Wojchiech Zurek 1982'de,

---

polarizasyon bulma olasılığıdır; $a^2+b^2=1$. Dolayısıyla dikeye 30 derece açılı, dikey bir polarize ediciden geçme şansı yüzde 75 olan bir foton için $a = \sqrt{3}/2$ ve $b = 1/2$.

bilinmeyen bir kuantum durumunun mükemmel bir kopyasını çıkarmanın imkânsız olduğunu kanıtlamışlardır. Durumun ne olduğuna dair önceden bir fikriniz yoksa, ölçmeye çalışırken fotonun durumunu değiştirirsiniz ve kopyanızın aslına uygun olup olmadığından emin olamazsınız. Truman RD'ye gerçekten de tek bir fotonun mükemmel bir kopyasını, fotonun polarizasyonunu önceden bilmeksizin göndermek istiyorsa bunu yapmanın daha akıllıca bir yolunu bulması gerekecektir.

"Neden fotonu gönderivermiyor ki?"

"Efendim?"

"Diyorum ki bu bir foton. Işık hızında yol alıyor; fotonların *yaptığı* şey bu. Benim bir fotonum olsaydı da başka bir köpeğe göndermek isteseydim... Yapmayacağım bir şey ya, diğer köpekler benim fotonlarıma *layık* değil. Yine de yapsaydım fotonu öbür köpeğe çevirir ve bırakırdım gitsin."

"Haa! Bak, bir yerden diğerine giderken yol üzerinde fotonun başına gelebilecek birçok şey vardır. Öbür köpeğin, fotonu kesinkes başlangıçtaki polarizasyonla aldığından emin olmak istiyorsan ışınlama bunu yapmanın emin bir yoludur."

"Ama yapılması istenecek aptalca bir iş."

"Hiç de öyle değil; ama nedenini anlamak için bu bölümün sonuna dek beklemen gerek."

Sihirli Bir Pusula:
Kuantum Işınlanmasının Klasik Benzeri

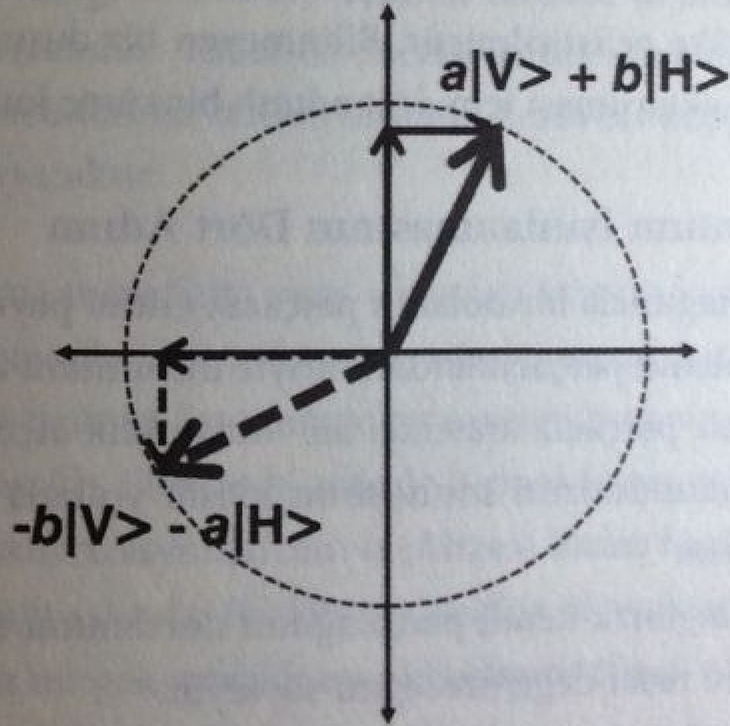
Kuantum ışınlanmasına klasik bir benzetme bulmak zordur; çünkü kapsadığı meseleler en baştan klasik değildir. Fakat neyi kapsadığını, foton ışınlanma sürecini grafik açıdan düşünerek biraz olsun koklayabiliriz. Kuantum ışınlanmasının gerçekten neyi gerektirdiğine dair bir ipucu da edinebiliriz.

Üçüncü bölümde gördüğümüz üzere, foton polarizasyonunu,

polarizasyonun yönünü gösteren bir okla temsil edebiliriz. Yatay ve dikey bileşenleri, farklı yönlerde attığımız adım sayısıyla düşünebiliriz: Dikey yönde *a* kadar adım atıyorsun, yatay yönde *b* kadar.

Bu grafikte, ışınlanma, okları aynı hizaya getirme sorunudur. Truman'ın bir yöne bakan bir oku vardır; RD de kendi okunu aynı yöne doğrultabilirse iki köpek biftek alacaklardır. Bunu nasıl başarırlar?

İki köpeğin oklarını aynı yöne doğrultmalarının tek yolu, ortak bir bilgi kaynaklarının olmasıdır. İkisinin de birer pusulası olursa Truman kendi okunu pusula iğnesinin yönüyle karşılaştırabilir ve RD'ye okunu kuzeyin 17 derece doğusuna getirmesini söyleyebilir. Pusula ikisinin de paylaştığı bir başvuru kaynağı olacaktır; bir foton ışınlanması planında da benzer bir başvuru kaynağına gerek vardır.



Işık polarizasyonunun yatay ve dikey bileşenlerin toplamı olarak temsil edilmesi. Büyük oklar iki farklı foton halini belirtir; küçük oklarsa yatay ve dikey bileşenleri.

Ama bir foton ışınlama problemi, kopyalamama kuramı yüzünden, okları aynı hizaya getirmekten çok daha zor bir problemdir. Truman okunun yönünü, o yönü bozmadan ölçemez. Okunun yönünü ölçmeksizin bu yönün ne olduğunu RD'ye iletmesi gerekmektedir. Truman'ın yerel olmayan bir başvuru kaynağına ihtiyacı vardır; bir ölçüm yapmadan RD'nin pusulasına bir yön bildirecek bir nevi sihirli bir pusulaya. Kuantum ışınlanması, yedinci bölümde tartıştığımız kuantum dolanıklığı bu tür yerel olmayan bir başvuru kaynağı sunduğu için mümkündür.

Bana Bir Foton Işınla: Kuantum Işınlanması

Kuantum ışınlanması, IBM'de çalışan bir grup fizikçi (klonlamama kuramının sahibi William Wootters da bu gruptaydı) tarafından 1993'te geliştirilmiştir. Bilinmeyen bir durumun bir yerden diğerine aktarılması için dört adımlı bir süreç kullanılır:

Kuantum Işınlanmasının Dört Adımı

1. Ortağınızla bir dolanık parçacık çiftini paylaşın.
2. Dolanık parçacıklardan biriyle durumunu ışınlamak istediğiniz parçacık arasında bir "dolanıklık ölçümü" yapın.
3. Ölçümünüzün sonuçlarını klasik yollarla ortağınıza gönderin.
4. Ortağınıza kendi parçacığının durumunu ölçüm sonucuna göre nasıl değiştireceğini söyleyin.

Bu ışınlanma reçetesi, keyfi olarak seçilmiş bir durumun bir kopyasının, bir ölçüm ve bir telefon görüşmesiyle uzak bir yerde oluşturulması için kuantum dolanıklığından yararlanır. İki dolanık fotondan birini "ışınlanacak" halle uyumlu hale getirmek için kuantum ölçümünün etkin doğasını kullanır. Bu süreç-

te ikinci dolanık foton, anında, ilk duruma bağlı olan bir polarizasyona çevrilir. Klonlamama kuramı hâlâ geçerlidir; bu yüzden de ilk parçacığın durumu ölçümle değişir; ama sürecin sonunda ikinci dolanık foton, "ışınlanma" öncesinde ilk fotonun durumundadır.

Bu süreç söyle işler: Truman'ın belli bir polarizasyon durumunda tek bir fotonu olduğunu düşünelim; bu durumu eski dostu RD'ye eksiksiz aktarmak istiyor. (Ama bunu doğruca ona gönderemiyor.) Böyle bir şey olabileceğini önceden düşünen Truman ve RD, dolanık haldeki bir foton çiftini paylaşmış, her biri bir foton almış. Bu fotonların polarizasyonları, ölçülünceye kadar kesin değil; ama birbirlerinin tersi olması garanti. Demek oluyor ki iki köpeğin elinde üç foton var: Birinci foton Truman'ın RD'ye aktarmak istediği ($a|D > + b|Y >$ olarak betimlenmiş, rastgele seçilmiş bir açıdaki) durumdur; ikinci foton dolanık çiftten Truman'ın aldığı fotondur; üçüncü fotonsa dolanık çiftten RD'nin aldığı fotondur. Yukarıda özetlediğimiz ışınlanma süreci RD'nin bu üçüncü fotonu birinci fotonun kesin bir kopyasına çevirmesini sağlayacaktır.

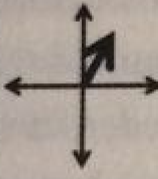
Işınlanma kuantum fiziği yerel olmadığı için işe yarar. Yedinci bölümde Truman'ın ikinci foton üzerinde yaptığı bir ölçümün RD'nin elindeki üçüncü fotonun polarizasyonunu anında belirleyeceğini görmüştük. Elbette ki mesele birinci foton ve ikinci fotonun tek tek polarizasyonlarının ölçülmesi kadar basit değildir. Truman'ın yaptığı aslında, iki fotonu *birlikte* ölçmektir. İki polarizasyonun aynı mı yoksa farklı mı olduklarını ölçer; ne olduklarına değil, aynı olup olmadıklarına bakar.

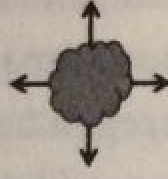
Truman yatay mı yoksa dikey mi olduklarını sorup iki fotonu tek tek ölçmüş olsaydı dört olası sonuç olurdu. İki foton dikey olabilir (bunu $D_1 D_2$ olarak yazarız; ilk harf birinci fotonun, ikincisi de ikinci fotonun polarizasyonunu gösterir); ikisi de ya-

tay olabilir ($H_1 H_2$); birinci foton dikey, ikinci foton yatay olabilir ($D_1 H_2$); birinci foton yatay, ikinci foton dikey olabilir ($H_1 D_2$). Bu dört sonucun belirme olasılıkları farklıdır ve bu da ilk halin polarizasyonunun ne olduğuna bağlıdır.

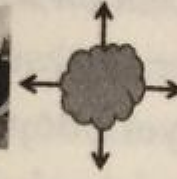
Işınlanma öncesi





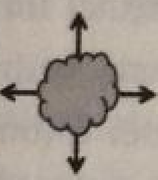


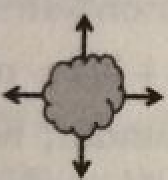




Işınlanma sonrası











Kuantum ışınlanmasının bir çizgi versiyonu. Sürecin başında Truman'ın iki fotonu vardır; birinci foton kesin (ama bilinmeyen) bir durumdadır ve Truman bu durumu RD'ye göndermeyi istemektedir; ikinci fotonsa RD'deki üçüncü fotonla dolanık bir halde olan belirsiz bir haldedir. Işınlanma sürecinin tamamlanması sonrasında Truman'ın birbiriyle dolanık, belirsiz halde iki fotonu olur; RD'nin de polarizasyonu birinci fotonun başlangıçtaki polarizasyonuna benzeyen bir fotonu vardır.

Işınlanma için Truman tek tek polarizasyonları ölçmez; aynı olup olmadıklarını sorar. Bu da yine dört olası sonuç verir; sonuçların ikisinde fotonların polarizasyonu aynı, ikisinde birbirinin tersidir. Bu "Bell halleri" bir dolanık foton çiftinin izinli durumlarıdır; Truman ölçüm yaptığında birinci ve ikinci fotonları bu dört durumdan birinde bulacaktır:

Durum numarası	Dalga Fonksiyonu	Polarizasyonlar
I	$\|D_1 D_2> + \|Y_1 Y_2>$	Aynı
II	$\|D_1 D_2> - \|Y_1 Y_2>$	Aynı
III	$\|D_1 Y_2> + \|Y_1 D_2>$	Ters
IV	$\|D_1 Y_2> - \|Y_1 D_2>$	Ters

Bu durumlar, bağımsız ölçümlerin dört olası sonucunun süperpozisyonlarıdır; tıpkı Schrödinger'in meşhur kedisinin "diri" ve "ölü" süperpozisyonunda olması gibi.[3] Polarizasyonların her biri hâlâ belirsizdir; birinci fotonun tekil polarizasyonunu ölçerseniz dikey ya da yatay sonucu almanız aynı derecede olasıdır. Birinci fotonu ölçtüğünüzde fotonun dört durumdan hangisinde olduğuna bağlı olarak ikinci fotonun durumunun da birinciyle aynı ya da ona ters olmasını belirlersiniz.

"Dur bakalım, neden dört olası sonuç var? Sadece iki tane olması gerekmez mi? Artılara eksilere ne gerek var? Sonuçlar ya birbirinin aynıdır ya da değildir."

"Doğru, ama kuantum mekaniğinde, iki fotonun aynı polarizasyonda olduğu iki farklı durum var; birinci ve ikinci durum; polarizasyonlarının birbirine ters olduğu iki durum var, üçüncü ve dördüncü durum. Böylece dört durum oluyor."

"Peki, ama birinci durumla ikincisi arasındaki fark ne?"

"Farklı durumlar; |D + |Y > ile |D - |Y > durumlarının tek bir foton için farklı durumlar olması gibi."

"Bir dakika... Farklı mı dedin?"

"Kesinlikle. Toplandıklarında, farklı bir açıdan tek bir polarizasyonu nasıl verdiklerine bakabilirsin. Şöyle düşünebilirsin: |D > bir adım sağda ya da soldadır, |Y > ise bir adım aşağı ya da yu-

---

3- O halde kesin bir dille ifade edecek olursak hali ölçülmeden önce Schrödinger'in kedisi iki halden birinde olabilir: "diri artı ölü" ya da "diri eksi ölü".

karıdır. Bu durumda |D > + |Y > bir adım yukarı, bir adım sağadır; |D > - |Y > ise bir adım yukarı, bir adım soladır."

"Yani |D > + |Y > dikeyin 45 derece sağına, |D > - |Y > ise dikeyin 45 derece soluna."

"Kesinlikle. Her ikisinin de yatay ya da dikey olarak ölçülme şansı yarı yarıyadır, ama bunlar farklı durumlardır. Polarize edici ni saat yönünde 45 derece çevirirsen, |D > + |Y > fotonlarının hepsi geçer; |D > - |Y > fotonlarının hepsi de engellenir."

"Yani, birinci durum yukarıya ve sağa, ikinci durum da yukarıya ve sola."

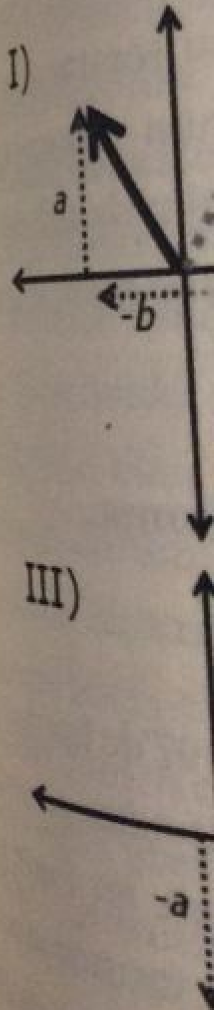
"Tabii, bundan daha karmaşık olacaktır. İki parçacık var; bu yüzden de bunu dört boyutlu ya da ona benzer bir şey yapman gerekiyor; ama evet temel fikir bu."

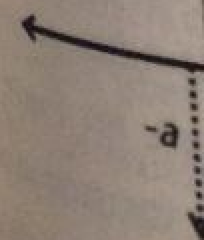
"Peki, sanırım bu aklıma yattı. Bir dakika... Baştaki iki dolanık fotonun polarizasyonlarının birbirine ters olması gerektiğini söylemiştin. Bu durumda üçüncü ve dördüncü durumda olmaları gerekmez mi?"

"Kesinlikle haklısın. Olağan ışınlanma sürecinde, ikinci ve üçüncü fotonların dördüncü durumda olması gerekir. Bunu daha önce belirtmedim; işleri gereksiz yere karıştıracağını düşündüm. İyi yakaladın."

"Çok akıllı bir köpeğimdir. Benden bir şey kaçmaz."

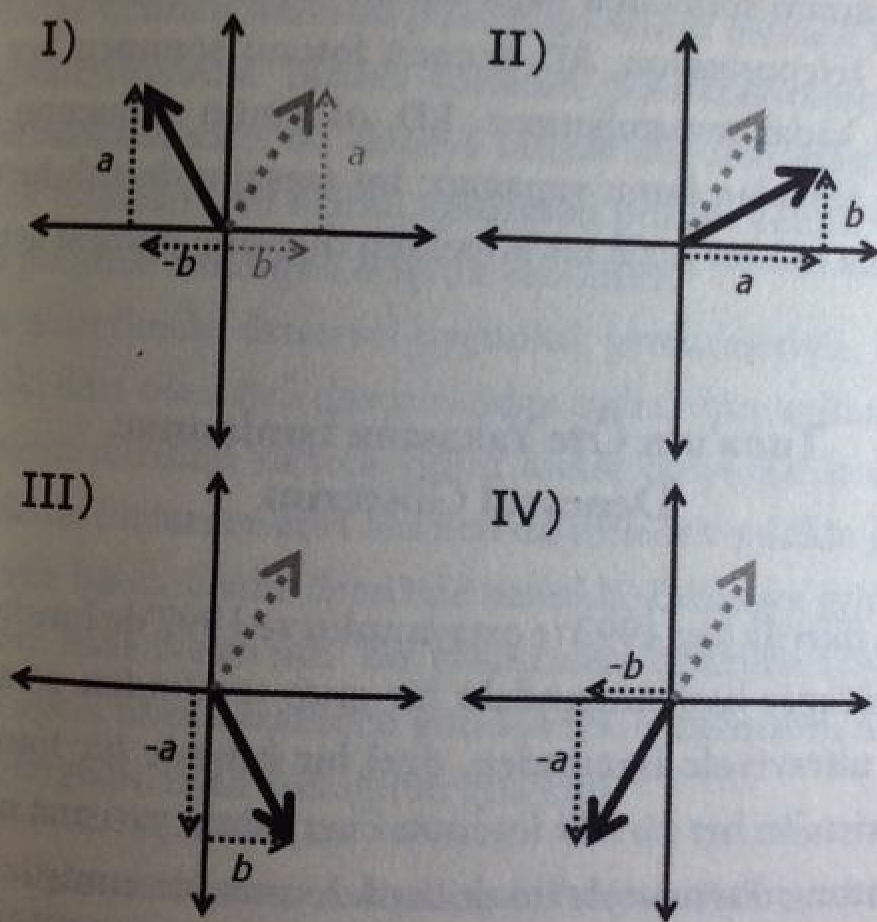
Truman, birinci ve ikinci fotonların polarizasyonlarının aynı olup olmadığını sorarak ölçümünü yaptığında, birinci ve ikinci fotonlar bu dört durumdan birine yansıtılır. O anda, ikinci ve üçüncü foton arasındaki dolanıklık, RD'deki üçüncü fotonun, Truman'ın ölçtüğü duruma bağlı olan belli bir polarizasyona girdiği anlamına gelir. RD'deki üçüncü fotonun polarizasyonu için dört olası sonuç vardır; bu polarizasyonun dikey ve yatay bileşenleri, Truman'daki birinci fotonun dikey ve yatay bileşenleriyle ilişkilidir.





Sonuçların her biri, ilk polarizasyon halinin basitçe döndürülmesidir; oklar farklı bir yönü gösterir; ama hâlâ bir yönde (yukarı, aşağı, sağa, sola) a kadar, diğer yönde b kadar adım atılmasını gerektirir. Truman'ın ölçüm sonucu dikkate alındığında, RD, Truman'daki fotonun ilk durumuna nasıl ulaşılacağını bilmektedir; bu durumun ne olduğunu bilmese bile.

O halde Truman'ın tek yapması gereken, RD'yi arayıp ona ölçümünün sonucunu söylemektir. O noktada RD, üçüncü fotonu doğru duruma sokmak için ne yapması gerektiğini tam olarak bilmektedir. Truman'ın ölçüm sonucuna dayanarak RD üçüncü fotonun polarizasyonunu döndürebilir ve başlangıçta Truman'ın elindeki durumu tam olarak yakaladığını bilir.



Truman'ın dolanıklık ölçümünün dört olası sonucuna bağlı olarak "ışınlanma" sonrası RD'deki üçüncü fotonun hali. Her hal, birinci fotonun (noktalı çizgi) baştaki polarizasyonunun basitçe döndürülmesidir.

Bu şema, birinci fotonun polarizasyon durumunu, üçüncü fotona aktarır; onu birinci fotonun başlangıç durumunun mükemmel bir kopyasına çevirir. Fakat bu süreçte, birinci ve ikinci fotonlar üzerinde yapılan dolanıklık ölçümü birinci fotonun durumunu değiştirmiştir; birinci foton, artık başlangıçtakiyle aynı durumda değildir; ikinci fotonla belirsiz bir dolanıklık halindedir. Her iki köpeğin de tam olarak aynı duruma ulaşması imkânsızdır; kopyalanmama kuramını desteklerler.

Işınlanmanın anında olmadığını da görürüz. Üçüncü fotonun polarizasyonu, Truman birinci ve ikinci fotonları ölçtüğünde anında belirlenir; ama atılması gereken bir adım daha vardır; çünkü üçüncü foton *doğru* duruma anında geçmez. Truman'ın yaptığı ölçümün sonucuna bağlı olarak dört olası durumdan birine girer. Teleportasyon, RD üçüncü fotonu sonuncu kez döndürünceye kadar tamamlanmaz. RD, ölçümün sonucunu belirten mesajı almadan bunu yapamaz; bu mesajın da ışık hızından az ya da ona eşit bir hızla bir köpekten diğerine gitmesi gerekir.

Tuna'nın Öte Yakasına Işınlanma: Deneysel Gösterim

Işınlanma fikri ilk kez 1993'te ortaya atıldı ve 1997'de Innsbruck'ta Anton Zeilinger başkanlığındaki bir grup tarafından gösterildi.[4] Grup bir ultraviyole lazerinden, özel bir kristale bir foton göndermiş, kristalin her biri ilk fotonun enerjisinin yarısına sahip iki kızılaltı foton çıkarmasıyla iki dolanık foton elde etmişti. Toplam dört foton elde etmek için kristale iki kez lazer ışını göndermiş-

4- Anton Zeilinger'i birinci bölümde moleküllerin kırılmasını gösteren grubun başkanı olarak, beşinci bölümde kuantum sorgulamasını yaparken görmüştük. Zeilinger uzun ve seçkin kariyeri boyunca kuantum mekaniğinin tuhaf ve harika özelliklerini gösteren deneylere imza atmıştır.

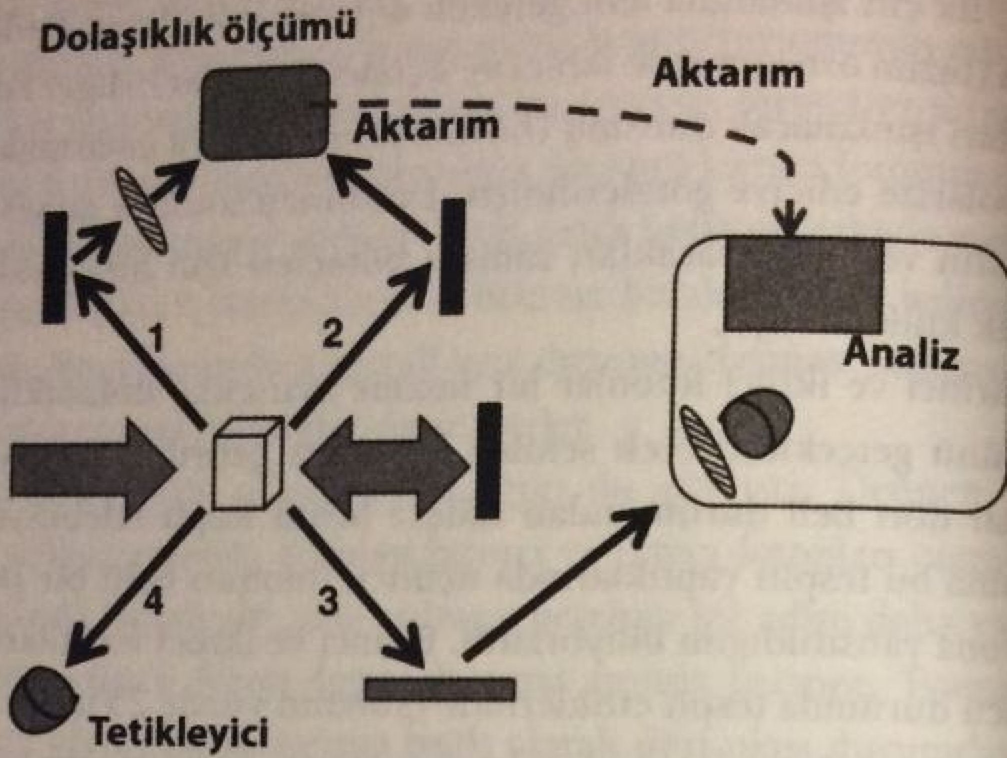
lerdi. İlk çift ışınlanma için gereken dolanık çift olarak kullanılmıştı (bizim örneğimizde ikinci ve üçüncü fotonlar); diğer ikisinden biri ışınlanacak durumu (birinci foton) ortaya çıkarmak için bir polarize ediciye gönderilmişti. Dördüncü fotonsa deneyi yapanların veri toplayacakları zamanı bilmeleri için bir tetikleyici olarak kullanılmıştı.

Birinci ve ikinci fotonlar bir huzme ayırıcıda, dolanıklık ölçümünü gerçekleştirecek şekilde bir araya getirildi. Deneyi yapanlar dört Bell durumundan sadece birini tespit edebiliyorlardı; ama bu tespiti yaptıklarında üçüncü fotonun belli bir polarizasyona yansıtıldığını biliyorlardı. Birinci ve ikinci fotonları dördüncü durumda tespit ettiklerinde (sürenin yüzde 25'inde), analiz ediciye üçüncü fotonun polarizasyonunu ölçmesi için bir sinyal gönderiliyordu. Birinci fotonun polarizasyonunu kendileri ayarladıklarından bu deneyi birçok kez tekrarlayabildiler ve üçüncü fotonun tam olarak ışınlanma protokolünün öngördüğü açıyla polarize edildiğini doğrulayabildiler.

İlk gösterimde, deneysel uygunluk gerekçeleriyle, ölçüm adımındaki dört olası Bell durumundan sadece biri kullanıldı ve polarizasyon durumu sadece yarım metre öteye ışınlandı. İzleyen deneylerde ölçümler dört sonucu da içerecek şekilde genişletildi ve mesafe hatırı sayılır derecede uzatıldı. Zeilinger grubu 2004'te fotonları Tuna Nehri'nin[5] bir yakasından öbürüne (yaklaşık 600 metre) optik fiber üzerinden göndererek ışınlamanın uzun mesafelerde uygulanabilir olduğunu gösterdi.[6]

5- İki deney arasında geçen yedi yıl içinde Profesör Zeilinger Innsbruck'tan Viyana'ya taşınmıştı.

6- Fotonları çok uzun mesafelere göndermek konusunda bir sorun yoktur; nihayetinde ışık çok uzak galaksilerden bize ulaşır; fakat ortamla etkileşim, dördüncü bölümde tartıştığımız uyum bozulması süreciyle dolanıklık hallerine zarar verebilir. Viyana deneyi, dolanık fotonları yararlı mesafelere gönderebilecek kadar uzun bir süre uyum bozulmasından kaçınılabileceğini göstermiştir.



Zeilinger grubunun ışınlanma deneyinin şeması. Bir ultraviyole lazer ışını, bir aşağı çevirme (downconversion) kristalinin içinden geçer ve burada iki kızılaltı foton çıkarır (foton 2 ve 3); bunlar ışınlanmada kullanılan dolanık çifttir. Ultraviyole lazer ışını daha sonra bir aynaya çarpar, kristalden yine geçer ve başka bir foton çifti üretir (foton 1 ve 4); bu fotonlardan biri ışınlanacak fotondur, diğeri ise deneycilerin dört fotonun da ortaya çıktığını bilmesini sağlayacak tetikleyicidir. Foton 1 ve 2 dolanıklık ölçümü için bir araya getirilir; uygun Bell durumunda oldukları görüldüğünde "ışınlama"yı doğrulamak için foton 3 ölçülür.

"İyi de bunun anlamı ne?"

"Ne demek istiyorsun?"

"Foton durumlarını ışınlayıp ışınlayamadığın kimin umurunda?"

"Durumları ışınlanabilecek tek şey fotonlar değildir. İki du-

rumlu herhangi bir sistem için aynı matematik kesinlikle geçerlidir; böylece aynı şemayı tek bir elektron spin halini ışınlamak için ya da iki enerji düzeyinin belli bir süperpozisyonunu bir atomdan diğerine aktarmak için kullanabilirsin."

"Evet, ama dolanık atomları ya da elektronları birbiriyle değiştiriyorsan neden onları ışınlamak yerine gönderivermiyorsun?"

"Atomik durumlar ve elektron spinleri hassastır; durumun karışmasına neden olmaksızın onları uzun mesafelere göndermek imkânsızdır. Yapabileceğin şey, bir atom almak, onu dolanık çiftten bir fotonla dolanıklaştırmak ve ilk fotonun durumunu uzaktaki başka bir atoma ışınlamak için diğer atomu kullanmaktır."

"İyi, bu biraz daha iyi de yine bir tane atom var."

"Öyle olması gerekmiyor. Kopenhag'daki Niels Bohr Enstitüsü'nden bir grup 2006'da, ışınlamayı bir grup atomun kolektif halini, başka bir grup atoma aktarmak için kullandı. İki grubun her birinde yaklaşık bir trilyon atom vardı; köpekler ve insanlarla kıyaslandığında düşük bir rakamdır; ama bu tekniği daha büyük sistemlere uygulayabileceğini gösterir."

"Kulağa hâlâ çok yararsız bir işmiş gibi geliyor; ama daha iyiye gidiyor sanırım."

"Teşekkür ederim. Çok naziksin."

Bütün Bunlar Neye Yarar? Işınlanmanın Uygulanma Alanları

Kuantum ışınlama, belli bir kuantum halini bir yerden diğerine aslına uygun olarak, baştaki nesneyi fiziksel olarak hareket ettirmeksizin aktarmak için dolanıklığı kullanmamızı mümkün kılar. Kuantum ışınlama, foton durumlarını uzak yerlerde yeniden üretmek için ya da bir atomun ya da atomlar grubunun bir süper-

pozisyon durumunu, bir başka atoma ya da atomlar grubuna aktarmak için kullanılabilir. Tabii, bilim-kurgunun idealinden hâlâ epeyce uzaktır.

Klasik faks makinesinde olduğu gibi, aktarılan tek şey enformasyondur. Kuantum ışınlama bir durumu ya da durumlar süperpozisyonunu bir yerden diğerine aktarmamızı mümkün kılar; tıpkı faks makinesinin bir belgenin üzerine basılı olan şeylerin faksını telefon hatları üzerinden göndermemizi mümkün kılması gibi. Fakat "ışınlanan" hal, bir atomun haliyse, ışınlama düzeneğinin öbür ucunda bekleyen uygun atomlar olması gerekir; tıpkı alıcı faks makinesinin kağıt ve mürekkeple dolu olmasının gerekmesi gibi.

Fakat hedefimiz bir nesneyi bir yerden diğerine aktarmaksa kuantum ışınlamasına *ihtiyacınız olup olmadığı* belli değildir. Kuantum ışınlama bir durumu bir yerden diğerine aktarır; ama bir yerden diğerine bir köpek ödülü gibi cansız bir nesne aktarıyorsanız kesin durumu korumanız gerekmeyebilir. Doğru molekülleri birbirleriyle ilişkili olarak doğru yerlerde bulundurduğunuz sürece, ödülün faksındaki atomların tam olarak ilk durumdakiyle aynı olmaması, tadında ya da dokusunda büyük bir farklılık yaratmaz. Asıl ihtiyacınız olan moleküler düzeyde çalışan bir faks makinesidir ve bunda içkin olarak kuantum bir şey yoktur.

Peki, o zaman kuantum ışınlamayı neden önemseyelim? Kuantum ışınlama cansız nesneleri hareket ettirmek için gerekmeyebilir; ama bilinçli oluşumları taşımak için kritik önemde olabilir. Bazı bilim insanları, bilinçliliğin esasen bir kuantum fenomeni olduğuna inanır; örneğin Roger Penrose *The Emperor's New Mind* adlı eserinde bu fikri savunur. Haklılarsa insanları ya da köpekleri taşımak, beyinlerinin halini düzgünce yeniden üretmek

için bir faks makinesine değil bir kuantum ışınlama cihazına ihtiyacımız olacaktır. Kuantum ışınlama, Scottie sizi Enterprise'a ışınladığında varacağınız yere, bıraktığınız yerden ayrılırkenki düşüncelerinizle varmanızı sağlamanın anahtarı olabilir.

Gerçi insanları ışınlamaya yaklaşmış bile sayılmayız; bu yüzden kuantum ışınlamaya bugün duyulan ilgi daha küçük nesnelere yöneliktir. Kuantum ışınlama, halle ilgili bilginin, bir yerden diğerine aktarılması gereken kritik kalem olduğu durumlarda yararlı ve önemlidir. Böyle bir şeyin bugünkü başlıca uygulama alanı kuantum bilgisayarlarıdır.

Bir kuantum bilgisayarı, bugün kullandığımız klasik bilgisayarlar gibi, esasen "0" ve "1" denilen iki hali üstlenebilecek büyük bir nesneler topluluğudur.[7] Bu "bit"leri birbirine bağlayıp rakamları temsil etmelerini sağlayabilirsiniz. Örneğin 229 sayısı sekiz bitli olarak "11100101" şeklinde temsil edilecektir.

Fakat bir kuantum bilgisayarında, "kubitler"[8] sadece "0" ve "1" durumlarında değil, "0" ve "1"in süperpozisyonlarında da bulunur. Ayrıca dolanık durumlarda da bulunabilirler; bir kubitin durumu farklı bir yerdeki diğer kubitin durumuna bağlı olur. Bu fazladan unsurlar, bir kuantum bilgisayarının bazı problemleri, klasik bilgisayarlardan çok daha hızlı çözmesini sağlar; örneğin büyük sayıların çarpanlarını almak gibi. Mesajları -ister hükümet sırları ister internet üzerinden yapılan kredi kartı işlemleri olsun- şifrelemek için kullanılan modern kriptografi düzenekleri, çarpan almanın yavaş bir süreç olmasına dayanır. İşleyen bir kuantum bilgisayarı bu şifreleri hızlıca çözebilir; bu da hükümetler ve bankaların kuantum bilgisayarlarına yoğun bir ilgi duyma-

---

7- Klasik bir bilgisayarda, silikon yongaların üzerinde milyonlarca minicik transistör kullanılır; kuantum bilgisayarları en azından iki durumu olan herhangi bir şeyi kullanabilir: atomlar, moleküller, elektronlar.

8- "ku" kuantumu ifade eder. Fizikçilerin zekice isimler bulma konusundaki becerileri pek takdir edilmez.

sına yol açmaktadır.[9]

Tek bir kubitin kesin kuantum hali, kuantum bilgisayarının işleyişi açısından kritik önemdedir; kuantum ışınlanmanın yararlı uygulamalarına burada rastlanabilir. Çok sayıda kubitin dahil olduğu bir hesaplama, bilgisayarda ciddi bir mesafeyle birbirinden ayrılmış iki kubitin dolanıklığını gerektirebilir. Işınlama, gerekli işlemleri gerçekleştirmenin yararlı bir yolu olabilir.

Bu yolda biraz daha ilerleyip farklı yerlerdeki iki ya da daha fazla sayıda kuantum bilgisayarını birbirine bağlamak; Caltech'ten Jeff Kimble'ın "Kuantum İnternet" dediği şeyi ortaya çıkarmak istersek dolanıklık ve ışınlamaya dayalı düzenlemeler temel önemde olabilir. Bu, bilgisayar işlemlerinin daha da iyileşmesini sağlayacaktır; tıpkı klasik internetin gündelik bilgisayarlarda yol açtığı biçimde.[10]

Nihai uygulama alanı ne olursa olsun kuantum ışınlama büyüleyici bir konudur. EPR makalesinde incelenen, kuantum dolanıklığının yerel olmayan etkilerinin ve "uzaktaki tekinsiz eylem"in kullanılabileceğini, bilginin daha geleneksel biçimlerde yapılamayacak şekilde aktarılabileceğini gösterir. Köpeklerin sincap yakalamasını sağlamaz (henüz değil); ama evrenin derin ve tuhaf kuantum niteliğiyle ilgili başka bir derin kavrayış kaynağıdır.

"Bilmem ki ahbap, bana hâlâ biraz ters geliyor."

"O nedenmiş?"

"Eh, bir şeye 'ışınlama' diyorsan, durum bilgisini aktarmaktan daha fazlasına yaramasını bekliyorum da ondan."

9- Aslında Ulusal Güvenlik Ajansı, ABD'de kuantum bilgisayarı araştırmalarının finansmanında en büyük pay sahiplerinden biridir.

10- Elbette, Nijerya'daki köpeklerin basit bir işleme yardımcı olmak için banka hesap bilgilerini vermemiz karşılığında bir milyar sterlinlik mama vaat eden kuantum e-postalarını da beraberinde getirecektir.

"Haklısın, bu bir talihsizlik. Ama bu ismi çıkaran ben değilim."

"Peki, dolanıklık bu kadar yani, öyle mi? Sırf Aspect deneyleri ve bir de ışınlama, ha?"

"Hayır, hiç de değil. Kuantum dolanıklığını kullanabileceğin birçok şey var. Söylediğim gibi, kuantum bilgisayarları için kilit önemde; ayrıca 'yoğun şifreleme' denilen şeyde, aktarılan her bit için iki bit enformasyon göndermekte de kullanabilirsin."

"Ama bu yine de oradan oraya enformasyon aktarmak işte."

"Ha, bir de kuantum kriptografisi var; dolanıklığı rastgele bir rakam dizisini bir kişiden diğerine aktarmak için kullanıyorsun; onlar da bu rakamları mesajların şifresini güvenli bir biçimde çözebilmek için kullanıyor. Kimsenin bu mesajlaşmaya kulak kabartması mümkün değil; çünkü kulak kabartma parçacıkların durumlarını değiştirip şifreyi tespit edilebilecek şekilde değiştirebilir."

"Yine hâlâ enformasyon."

"Evet, kesinlikle; ama kuantum fiziğini düşünmenin uygun biçiminin enformasyon olduğunu düşünenler var. Bir anlamda, bütün fizik bilimi aslında enformasyonla ilgili."

"Yok ya? Eh, ben de bir köpeğim, ben de tamamen sincaplarla ilgiliyim."

"Peki, ama bu da gerçekten enformasyonla ilgili."

"Nasıl oluyor o?"

"Bilgin olsun diye söylüyorum; çimenlerin tam ortasında oturan koca bir sincap var."

"Ooo! Şu tombul gürültülü sincaplar."

IX

Peynirden Yapılmış Tavşancıklar: Sanal Parçacıklar ve Kuantum Elektrodinamiği



Emmy pencerede durmuş, kuyruğunu heyecanlı heyecanlı sallıyor. Dışarıya bakıyorum, bahçe boş. "Nereye bakıyorsun?" diye soruyorum.

"Peynirden yapılmış tavşancıklara!" diyor. Yine bakıyorum, bahçe hâlâ boş.

"Orada tavşan yok ki," diyorum; "Peynirden yapılmış tavşanlar da yok. Arka bahçe bomboş."

"Ama boş uzayda hep parçacıklar oluşuyor, değil mi?"

"Hâlâ benim kuantum fiziği kitaplarımı mı okuyorsun?"

"Sen evde olmadığında burası sıkıcı oluyor. Onu boş ver, soruma cevap ver."

"Evet, bir anlamda öyle. Bunlara sanal parçacıklar deniyor; doğru koşullarda, boşluğun sıfır noktası enerjisi zaman zaman, biri normal madde, diğeri karşıt maddeden oluşan parçacık çiftleri olarak tezahür edebilir."

"Gördün mü?" diyor, daha da sert sallayarak kuyruğunu. "Peynirden yapılmış tavşancıklar!"

"Bu ne işine yarar bilemiyorum," diyorum. "Sanal parçacıkların, enerji-zaman belirsizlik ilkesi gereği çok kısa bir süre için-

de birbirlerini ortadan kaldırması gerekir. Sanal bir elektron-pozitron çiftinin ömrü 10^{-21} saniyedir; sonra ortadan kaybolur. Gerçek parçacıklar olabilecek kadar uzun bir süre etrafta bulunmazlar."

"Ama gerçek olabilirler, öyle değil mi?" Biraz endişelenmiş görünüyor. "Yani, Hawking ışınımı ne oluyor?"

"Evet, bir anlamda kesinlikle öyle. Fikir şudur: Bir kara deliğin yakınlarında oluşmuş bir sanal parçacık çiftinin bir üyesi kara deliğin içine çekilebilir; bu noktada diğer parçacık yırtar ve gerçek olur."

Yeniden kuyruk sallamaya başlıyor. "Peynirden yapılmış tavşancıklar!"

"Ne?"

Rahat bir nefes alıyor. "Bak, sanal parçacıklar her an oluşuyor, öyle değil mi? Bizim bahçemizde de?"

"Evet. Bu doğru."

"Tavşancıklar da dahil?"

"Teknik olarak bir tavşancık-karşıt tavşancık çifti olması gerekir."

"Ve bu tavşancıklar, peynirden yapılmış olabilirler."

"Pek muhtemel değil; ama Max Tegmark'ınki[1] gibi 'mümkün olan her şeyin var olması gerekir' tarzı bir evrende sanırım bir peynirden (ve karşıt peynirden) bir tavşancık-karşıt tavşancık çiftinin arka bahçede oluşması olasıdır; ama..."

"Eh, ben de onlardan birini yersem diğeri gerçek olur." Kuyruğunu o kadar şiddetli sallıyor ki bedeninin neredeyse bütün arka kısmı sallanıyor."

1- Max Tegmark MIT'de görevli bir kozmologdur; evrenimizin daha geniş bir "çoğul evrende"ki çok sayıdaki evrenden biri olduğunu ileri sürmesiyle bilinir. Tegmark'a göre, bu çok evrende matematiksel olarak tanımlanabilecek her tür olası evren bulunmaktadır; bize hiçbir anlam ifade etmeyecek olanlar bile. Tegmark'ın çalışmaları biraz, filozof David Kellogg Lewis'in "modal gerçekçilik" çalışmalarına benzer.

"Evet, ama birbirlerini ortadan kaldırmaları pek uzun sürmez."

"Çok hızlıyımdır."

"Bir tavşancığın kütlesi dikkate alınırsa ömürleri ancak 10^{-52} saniye sürer."

"Bu durumda, beni dışarı çıkarsan iyi olur. Peynirden yapılmış tavşancıkları yakalayabilirim böylece."

İçimi çekiyorum. "Dışarı çıkmak istiyorsun madem neden doğru dürüst söylemiyorsun?"

"Neresi eğlenceli olacak? Hadi bakalım, peynirden yapılmış tavşancıklar!"

Yine pencereden bakıyorum. "Ben hâlâ tavşancık göremiyorum; ama kuş yemliğinin orada bir sincap var."

"Ooo! Sincaplar!" Kapıyı açıyorum; sincabın peşinden fırlayıp koşuyor; sincap tam zamanında ağaca tırmanıveriyor.

İkinci bölümde maddenin dalga niteliğinin sıfır noktası enerjisine yol açtığını görmüştük; bu hiçbir kuantum parçacığının tam anlamıyla duruyor olamayacağı, her zaman bir enerjisi olacağı anlamına geliyordu. İnanılmazdır, ama bu fikir boş uzay için dahi geçerlidir. Kuantum fiziğinde, mükemmel bir boşluk bile sürekli bir faaliyet fırtınasıdır; sıfır noktası enerjisi sayesinde sanal parçacıklar kısacık bir an boyunca varlık bulur, sonra yine kaybolup gider.

Boş uzayın ortasında aniden varlık bulup ortadan kaybolan "sanal parçacıklar" fikri, modern fiziğin en tuhaf fikirlerinden biridir. Bu bölümde kuantum elektrodinamiğinden, sanal parçacıklar fikrinin gelişmesinin ardındaki kuramdan bahsedeceğiz. Kuantum elektrodinamiğini, bilim tarihinin en kesin test edilmiş kuramı haline getiren deneyleri de anlatacağız. İroniktir, bu ultra kesin kuram hakkındaki tartışmalarımızın Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle başlaması gerekiyor.

Saymak Zaman Alır: Enerji-Zaman Belirsizliği

Belirsizlik ilkesinin en iyi bilinen versiyonu, ikinci bölümde bahsettiğimiz, bir parçacığın konumu ve momentumundaki belirsizliklere bir sınırlama getiren versiyonudur. Çok temel bir düzeyde, bir parçacığın konumu hakkında ne kadar fazla şey bilirsek ne kadar hızlı hareket ettiğine dair o kadar az şey biliriz; aynı şey tersi için de geçerlidir.

Enerjideki belirsizliğin, zamandaki belirsizlikle çarpımının, Planck sabitinin 4 pi'ye bölünmesinden daha büyük olması gerektiğini söyleyen, enerji ile zaman arasındaki belirsizlik ilişkisi biraz daha az bilinir.

$$\Delta E \, \Delta t \geq h/4\pi$$

Konum-momentum belirsizliğinde olduğu gibi, bu da iki nicelikten biri hakkında daha fazla bilgi sahibi olduğumuzda öbürü hakkında daha az şey bileceğimiz anlamına gelir.

Enerjinin bir şekilde zamanla ilgili olduğu fikri başta tuhaf görünebilir; ama ışığı düşünerek bunu daha iyi anlayabiliriz. Birinci bölümde gördüğümüz üzere bir fotonun enerjisi o ışığın rengiyle ilişkili frekansla belirlenir. O halde, kesinliğin düşük olduğu enerji ölçümleri, frekansın kesin ölçümünü gerektirir.

Peki, frekansı kesin olarak nasıl ölçersiniz? Düşünün ki heyecanlı bir köpeğin kuyruk sallama oranını ölçmek istiyorsunuz; frekans ve büyüklükte küçük dalgalanmaların olduğu hayli düzenli bir salınımdır bu: Köpeğiniz bazen biraz daha hızlı, bazen biraz daha yavaş, bazen biraz daha sağa doğru, bazen biraz daha sola doğru sallar kuyruğunu. Sallama frekansını ölçmenin en iyi yolu nedir?

Frekans saniye başı salınımlarla ölçülür; bu yüzden de sabit bir zaman aralığında gerçekleşen sallama sayısını ölçmeniz gere-

kir. Beş saniye bekler, on kuyruk sallama ölçerseniz, bu, saniyede iki salınıma denk gelen bir frekanstır. Gerçi böyle bir ölçümde her zaman bir belirsizlik olacaktır. On salınma saydınız diyelim; bu gerçekten de eksiksiz on salınma mıydı yoksa on ve biraz daha fazla mı salınım söz konusuydu? Köpeğinizin kuyruğu tam sağa doğru mu gitti, yoksa o süre zarfında daha da uzağa mı salladı kuyruğunu?

Bu belirsizliği en aza indirmek için, daha uzun bir süre boyunca izlemeniz gerekir. Kuyruk sallama sayımınızdaki belirsizlik, daimi olma eğilimindedir; diyelim ki kuyruk sallama sayısının onda biri kadardır; bu yüzden de ne kadar fazla salınım sayarsanız, görece belirsizlik konusunda daha iyisini yaparsınız.

Beş saniye boyunca bir kuyruğun sallanmasını izler de on artı-eksi onda bir salınım sayarsanız, ölçtüğünüz frekans şudur:

f=(10 +- 0,1 salınım) / (5 saniye) = 2,00 + - 0, 02 Hz.[2]

Başka bir deyişle frekans saniyede 1,98 ile 2,02 salınım arasındadır.

Elli saniye boyunca seyrederseniz (köpeğin sabırsızlıktan patlamadığını varsayıyoruz), yüz artı-eksi onda bir kuyruk sallama ölçersiniz; bu durumda frekans şudur:

f= (100 + - 0,1 salınım) / (50 saniye) = 2,000 + - 0,002 Hz.

Ölçtüğünüz salınım sayısının artması, frekansın belirsizliğinde bir azalmaya, köpeğin ne kadar mutlu olduğunu daha kesin olarak belirlemeye yol açar.

Frekansın belirsizliğindeki bu azalmanın bedeli, zaman belirsizliğinde bir artıştır. Enerji belirsizliğinin onda birini elde etmek

---

2- Frekans birimi "Hertz" Hz olarak kısaltılır. Işığın elektromanyetik bir dalga olduğunu deneysel olarak gösteren ilk fizikçi olan Alman fizikçi Heinrich Hertz'e atfen verilmiş bir addır.

için, ölçümü yapmaya on kat daha fazla zaman harcadınız; bu da frekansı *ne zaman* ölçtüğünüzü kesin olarak söyleyemeyeceğiniz anlamına gelir. O elli saniyedeki *ortalama* frekansı biliyorsunuz; ama belli bir anı gösterip o sırada frekansın 2 Hertz olduğunu söyleyemezsiniz. Söyleyebileceğiniz tek şey o süre zarfında frekansın yaklaşık 2 Hz olduğudur; ama belli bir anda frekans daha hızlı ya da daha yavaş olabilir.

Ölçüm süresi konusunda daha kesin olabilirsiniz; örneğin sadece yarım saniye boyunca izleyip bir kuyruk sallama ölçebilirsiniz; ama o zaman da frekans belirsizliği daha büyük olur; f = 2,0 + - 0,2 Hz. Hem salınımın frekansında hem ölçüm süresinde küçük bir belirsizlik elde edemezsiniz.

Aynı mantık, salınımları elle sayılamayacak kadar hızlı olsa da ışığın frekansının ölçümünde de geçerlidir. Işık ile atomlar arasındaki etkileşimde bu belirsizlik ilkesinin doğrudan iş başında olduğunu görürüz. İkinci ve üçüncü bölümlerden, atomların ancak belli mümkün enerji durumlarında bulunabileceğini; bu durumlar arasında foton yutarak ya da salarak geçiş yaptıklarını biliyoruz.

Bir atom bir yüksek enerji durumundan düşük enerji durumuna geçerse, saldığı fotonun frekansı, iki durum arasındaki enerji farklılığıyla belirlenir. Fakat bu enerji farklılığının, atomun yüksek enerji durumunda ne kadar zaman kaldığına dayanan bir belirsizliği vardır. Aynı yüksek enerji durumuna yerleştirilmiş birbirinin aynı iki atom, frekansları çok hafif farklılıklar gösteren fotonlar salabilir.

Farklılık çok küçüktür; tipik atomlar açısından; fotonların frekansının yüz milyonda biri kadardır. Bu farklılık, lazer kullanarak ölçülebilir; bu küçük frekans belirsizliği atomik özelliklere dair kesin ölçümler yapma becerimizi sınırlar.

"Yani, şeyleri saymak biraz zaman alıyor. Büyük işmiş. İyi

de bütün bunların peynirden yapılmış tavşancıklarla ne alakası var?"

"Frekans sayımı örneğin, daha genel bir ilkeye verilmiş bir örnek yalnızca. Enerji-zaman belirsizliği, enerjinin hangi biçimi söz konusu olursa olsun geçerlidir."

"Nedenmiş o?"

"Bak şimdi, bütün enerji biçimlerinin eşdeğer olması gerekir; çünkü bir enerji biçimini diğerine çevirebilirsin. Enerjisi kesin olmayan bir fotonun varsa, bu fotonu bir elektronu hareket ettirmek için kullanırsan, o elektronun kinetik enerjisi de belirsiz olmalıdır."

"Ben yine anlamadım, bunun tavşanlarla ne alakası var?"

"Einstein'ın görelilik kuramından kütle ile enerjinin eşdeğer olduğunu biliyoruz."

"$E=mc^2$!"

"Aynen öyle. Kütle enerjinin sadece başka bir biçimi olduğundan, enerjiyi kütleye, kütleyi de enerjiye çevirebilirsin. Başka bütün enerji biçimleri gibi kütlenin de bir belirsizliği vardır ve bu belirsizlik, kütlenin ne kadar zamandır var olduğuyla ilgilidir."

"Yani peynirden yapılmış bir tavşancığın belirsiz bir kütlesi mi olur?"

"Öyle. Kısa bir süredir varsa bu belirsizlik çok yüksek olacaktır; sadece 10^{-25} saniye var olan üst kuark gibi bir şey için bu şeyin ömrünün bu kadar sürmesinden kaynaklanan belirsizlik toplam kütlesinin yüzde 1'ine eşittir."

"Peki ya uzun zamandır varsa, o zaman kütlenin belirsizliği küçük mü olur? Kütle belirsizliği az olan peynirden bir tavşancık isterim ben!"

"Eh, sana iyi şanslar! Peynirden yapılmış bir tavşancığın ömrü son derece kısa olur."

"Ah, iyi noktaya parmak bastın."

İnsanlar Uzaktayken..: Sanal Parçacıklar

Peki, buradan peynirden yapılmış tavşancıklara nasıl geliriz? Bu belirsizlik ilkesini boş uzaya uyguladığımızı düşünelim. Uzun bir süre boyunca küçük bir bölgeye bakarsak, oranın boş olduğundan gayet emin olabiliriz. Fakat kısa bir süre boyunca bakarsak boş *olmadığını* kesin olarak söyleyemeyiz. Uzayın o bölümü bazı parçacıklar içeriyor olabilir; kuantum mekaniğinde bu öyle olacağı anlamına gelir.

Uzayın boşluğuyla ilgili belirsizlik ilk başta görünebileceği kadar tuhaf değildir. Bir fizikçi ya da sahnede gösteriler yapan bir sihirbaz bir köpeğe rahat rahat inceleyeceği bir kutu verirse köpek kesin olarak kutunun boş olduğu sonucuna varabilir. Kutunun bütün köşelerini koklar, sahte düğmeleri kontrol eder, minik girintilere hiçbir şeyin gizlenmemiş olduğundan kesinlikle emin olur. Gelgelelim kutuya sadece bir göz atmasına ya da içini çabucak koklamasına izin verilirse kutunun boş olduğundan o kadar da emin olamaz. Kutunun bir köşesine, köpeğin o kısacık sürede tespit edemediği bir şey sıkışmış olabilir.

Kutunun boş olup olmadığını belirlemek için gereken süre, bulmayı beklediğiniz şeyin büyüklüğüne de bağlıdır. Kutunun içinde Profesör Schrödinger'in şu meşhur kedisinin bulunup bulunmadığını belirlemek için çok da uzun süre bakmanız gerekmez; ama içinde çok daha küçük bir nesnenin, örneğin bir ödül kırıntısının bulunduğunu yanlışlamak için bakıyorsanız çok daha incelikli bir teftişe gerek vardır ve bu da zaman alır.[3]

Aynı fikir enerji-zaman belirsizliği fikri üzerinden kuantum fiziğinde boş uzay açısından da geçerlidir. Boş bir kutuya uzun bir zaman boyunca bakacak olursak içindeki enerjiyi küçük bir

3- Köşelere sıkışmış gerçekten çok küçük kırıntıları koklamakta burunları pek işe yaramayan insanlar için bu çok daha zordur.

belirsizlikle ölçebilir, kutuda hiç parçacık olmadığını, sadece sıfır noktası enerjisi bulunduğunu bilebiliriz. Gelgelelim kısa bir süre boyunca bakarsak enerjideki belirsizlik çok büyük olabilir. Einstein'ın ünlü $E=mc^2$'si gereği enerji kütleyle eşdeğer olduğundan, bu, kutunun parçacık *içermediğinden* emin olamayacağımız anlamına gelir. Schrödinger'in kedisinde olduğu gibi, kutuda olan şeyin kesin halini bilmiyorsak o şey izinli durumların süperpozisyonundadır. Kedi hem diri hem ölüdür; kutu da *aynı anda* hem boştur hem de her tür parçacıkla doludur.

Başka bir deyişle, onları doğrudan görmemizi mümkün kılmayacak kadar hızlı belirip kaybolmaları koşuluyla kutuda bazı parçacıklar olabilir. Peki, parçacıkların bu kadar uygun bir biçimde kaybolmasını nasıl düzenleriz? Sıradan parçacıklar biz bakmıyorken kaybolmazlar; tabii eğer yenilmiyorlarsa ve ortalıkta bir köpek yoksa.

Biri madde diğeri karşıt madde olarak çiftler halinde gelmeleri koşuluyla parçacıklar kutudan kaybolabilir. Evrendeki her parçacığın onunla aynı kütleye sahip, tam tersi yüklü bir karşıt madde eşdeğeri vardır; elektronun karşıt parçacığı pozitrondur; protonun karşıt parçacığıysa karşıt proton, böyle devam eder. Sıradan bir madde parçacığı, karşıt parçacığıyla temas ettiğinde iki parçacık birbirlerini ortadan kaldırır; kütleleri enerjiye döner.

Pratik anlamda, bu, bir parçacık ile karşıt parçacığının kutunun içinde hiçbir şeyden varlık bulabileceği anlamına gelir. Bu durum, kutunun içindeki enerji miktarını geçici olarak küçük bir miktar artırır; bir elektron-pozitron çifti enerjiyi iki elektron kütlesinin ışık hızının karesiyle çarpımı kadar artırır; fakat iki parçacık birbirlerini yeterince kısa bir sürede imha edebildikleri sürece sorun yoktur; çünkü enerjideki belirsizlik fazladan iki parçacığı kapsayabilecek kadar büyüktür.[4]

4- Başka bir deyişle, parçacık-karşıt parçacık çifti kısa bir süre için var olurlarsa kütlelerinin büyük bir belirsizliği olur. Süre yeterince kısaysa

Kutunun belli bir tipte bir parçacık içerme olasılığı olduğunu ortadan kaldırmak için ne kadar uzun süre bakmamız gerekir? Enerjideki belirsizliğin, parçacığın $E=mc^2$ denkleminden kaynaklanan enerjisinden daha küçük olması gerekir; böylece zaman kütleye bağlı olacaktır. Enerji belirsizliğini, kutunun bir elektron bir pozitron içerme olasılığını devre dışı bırakacak kadar küçük kılmak için kutuya sadece 10^{-21} saniye bakmamız gerekir. Bir saniyenin trilyonda birinin milyarda biri kadar kısa bir süre boyunca yani; ışığın bir atomun bir tarafından öbür tarafına yol alması için gereken süreden biraz daha az. Bir proton ve karşı protonun daha büyük bir kütlesi olacaktır ve daha da kısa bir süre boyunca, 10^{-24} saniye kadar var olacaklardır. Kütlesi bir kilo olan bir tavşan (peynirden yapılmış olsun olmasın) ancak 10^{-52} saniye boyunca var olacaktır;[5] yani 0,000000000000000000000000000000 0000000000000000000001 saniye.

"Bence sen bu meseleyi gereğinden fazla karmaşıklaştırıyorsun. Sıfır parçacıkları ölçmek ne kadar zordur?"

"Akşam yemeğini hazırlarken bir yiyecek molekülü düşürmüş olmamız olasılığı üzerine *bütün* mutfak zeminini koklaması gereken bir köpek mi soruyor bu soruyu?"

"Ama bazen yiyecek *düşürüyorsunuz*, ben de sizin yiyeceklerinizi benimkilerden daha fazla seviyorum."

"Mesele, sıfırı ölçmenin gerçekten de zor olması. Bir şeyin değerinin gerçekten de kesin sıfır olduğunu hiç söyleyemezsin; sadece değerin, ölçümünle ilişkili belirsizlikten büyük olmadığı-

---

kütlenin belirsizliği kütleden büyük olabilir; bu durumda kütlenin sıfır *olmadığını* söyleyemeyiz. Bu durumda da bu kısa süre boyunca var olabilirler; çünkü kütleleri sıfır olan iki parçacık kutunun içindeki enerjiyi artıramaz.

5- Bu, hiç anlamı olmayacak kadar kısa bir süredir; bazı ilginç kuramlarda zamanın kendisi de kuantum parçalarına ayrılmıştır ve 10^{-44} saniyelik (Planck zamanı) parçalar halinde ele alınır. Bu gibi modellerde bundan daha kısa bir zaman aralığının bulunması mümkün değildir.

nı söyleyebilirsin. Bütün bilimsel kariyerlerini şeylerin sıfır değerinde olduğunu daha büyük bir kesinlikle ölçmeye harcayan insanlar vardır."

"Kulağa çok sıkıcı geliyor."

"Belli bir kişilik tipi gerektiriyor. Her neyse, bu ayrı bir mesele; çünkü sanal parçacıkların var olduğunu biliyoruz; etkilerini gözlemleyebiliyoruz."

"Bir dakika... Bu şeyler çok kısa bir süre boyunca var oluyorlarsa nasıl oluyor da onları tespit edebiliyorsunuz?"

"Onları tespit edemiyoruz, doğrudan yapamıyoruz bunu. Başka parçacıklar üzerindeki etkilerini görebildiğimiz için var olduklarını biliyoruz. Var olup kaybolan sanal parçacıklar gerçek parçacıkların birbirleriyle etkileşim biçimlerini değiştiriyorlar."

"O nasıl oluyor?"

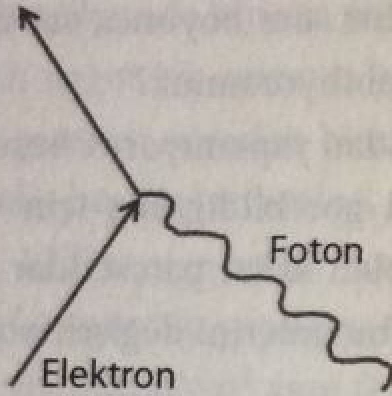
"Bak..."

Her Tablo Bir Hikaye Anlatır: Feynman Diyagramları ve Kuantum Elektrodinamiği

Sanal parçacıklar; doğrudan görülemeyecek kadar hızlı belirip kaybolan parçacıklar, ciddi bir bilimsel kuram için fazlasıyla hayal ürünüymüş gibi görünebilir. Aslına bakarsanız, bu parçacıkların, en temel düzeyde ışık ile madde arasındaki etkileşimi betimleyen, kuantum elektrodinamiği olarak bilinen kuram açısından kesinlikle kritik önemde bir yönü vardır. Kuantum elektrodinamiği elektronlar arasındaki, elektronlarla elektrik ya da manyetik alanlar arasındaki bütün etkileşimleri elektronların foton yutması ya da salmasıyla betimler.

Kuantum elektrodinamiğinin en tanınmış biçimi, ünlü fizikçi ve renkli karakter Richard Feynman'ın adıyla anılan Feynman

diyagramlarına dayanır; Feynman bu diyagramları, hesaplamaya yönelik bir tür kestirme yol olarak geliştirmiştir. Bu diyagramlar karmaşık hesaplamaları, parçacıklar etkileşim kurduğunda neler olduğunu hikâye eden tablolar halinde sunar.[6] Bir elektronun bir elektrik ya da manyetik alanla etkileşimini konu alan en basit Feynman diyagramı şöyle görünür:

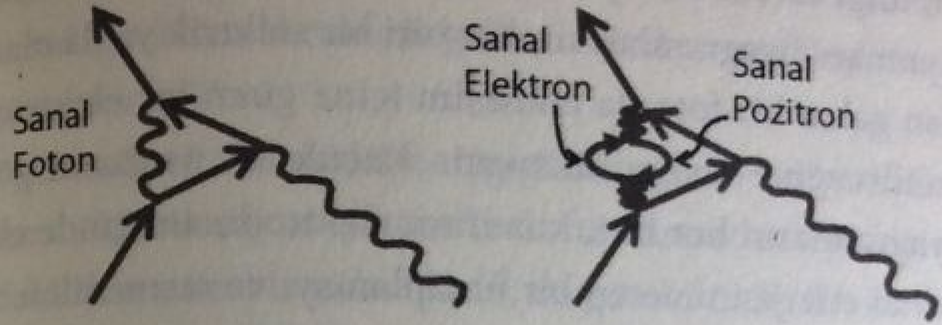


Düz çizgiler, uzayın bir bölgesinde hareket eden bir elektronu gösterir; zikzaklı çizgiyse elektromanyetik alandan çıkmış bir fotonu gösterir. Bu diyagramda zaman tablonun altından yukarıya doğru akar; yatay yön uzayda hareketi gösterir; böylece diyagram kendisini resimli bir hikâye gibi anlatır: "Bir zamanlar bir elektron vardı, bir fotonla etkileşime girdi ve hareket yönünü değiştirdi."

Bu küçük hikâyenin ne kadar sıkıcı olursa olsun, ışıkla etkileşim içine giren bir elektrona neler olduğunu anlatan eksiksiz bir

6- Feynman fiziğe çok sezgisel yaklaşmasıyla ünlüydü; geliştirdiği diyagramlara dayalı teknik de büyük bir kabul gördü; çünkü kuantum elektrodinamiği için gerekli karmaşık hesaplamaları düşünmenin uygun bir biçimini sunuyordu. Feynman kendi çalışmalarını yürüttüğü sırada Julian Schwinger aynı problemlerle ilgili daha formel bir yaklaşım geliştirdi; onun yaklaşımı Feynman yaklaşımının vardığı sonuçların aynılarını matematiksel olarak daha katı bir yaklaşımla veriyordu. Bugün kuramsal fizikte her iki yaklaşım da yaygın olarak kullanılır; Feynman ile Schwinger 1965 Nobel Ödülü'nü Schwinger'in geliştirdiği tekniklerin bazılarını bağımsız olarak geliştirmiş Shin-Ichiro Tomanaga'yla paylaşmıştır.

tablo olduğunu düşünebilirsiniz; ama sanal parçacıklar sayesinde çok sayıda başka olasılık bulunduğu anlaşılmaktadır. Örneğin şu gibi diyagramlar olabilir:



Bu diyagramlar daha olaylı hikâyeler anlatmaktadır: Solda elektronumuz uzayda hareket etmektedir; elektromanyetik alandan gelen fotonla etkileşime girmeden önce sanal bir foton salar[7] ve yönünü değiştirir. Sonra alandan gelen gerçek bir fotonu yutar, yeniden yön değiştirir; sonra daha önce saldığı sanal bir fotonu yeniden yutar. Sağdaki diyagram daha da tuhaftır: Sanal foton bir elektron-pozitron çiftine dönüşür,[8] sonra bu parçacıklar birbirlerini ortadan kaldırırlar ve tekrar bir fotona dönüşürler ve bu foton da yeniden yutulur.

Bu diyagramlar sanal parçacıklarla normal fizik kanunları arasındaki tuhaf ilişkiyi göstermektedir. Sanal parçacıklar, bazı temel fizik kurallarına uymuyormuş gibi görünür; gerçek bir elektron hiçbir zaman bir fotonun önüne geçip onu yeniden yutacak kadar hızlı hareket edemez; ama sanal parçacıklar enerji-zaman belirsizliğini çiğneyecek kadar uzunca bir süre ortalıkta bulunmadıklarından bu kuralları kırabilirler. Bu durum, tıpkı bir kö-

7- Bir Feynman diyagramında "hikâye"nin son bulmasından önce belirip kaybolan bir parçacık "sanal bir parçacıktır."

8- Bir pozitron matematiksel olarak zamanda geriye doğru giden bir elektron olarak tanımlanabilir; bu da Feynman'ın geliştirdiği bir numaradır; okun aşağıyı göstermesinin sebebi budur.

pekle mobilyalar arasındaki ilişkiye benzer: İnsanlar bakıyorlarsa kanepenin üzerinde olmak kesinlikle yasaktır; ama etrafta insanlar olmadığı sürece, köpek onlar kendisini görmeden kanepeden kalkabildiği sürece kanepe kestirmek için muhteşem bir yerdir.

Feynman diyagramlarının her biri bir elektrik ya da manyetik alandan gelen bir fotonla etkileşim içine giren bir elektrona neler olabileceğine ilişkin hikâyenin küçük bir parçasını gösterir. Bu diyagramların her biri, kuantum elektrodinamiğinde elektronun nihai enerjisini veren bir hesaplamayı ve resmedilen olayların gerçekleşme olasılığını temsil eder. Sanal parçacıkların sayısını artırdığınızda diyagramlar daha az olası hale gelir; ama çok çabuk gerçekleşmeleri koşuluyla olası olmayı sürdürürler.

Önceki sayfadaki diyagramlarda sadece elektronlar, pozitronlar ve fotonlar vardı; ama herhangi bir parçacık sanal parçacık olabilir. Bir parçacığın belirme olasılığı kütlesinin artmasıyla birlikte azalır; bu yüzden sanal bir proton-karşıt proton çiftinin belirmesi sanal bir elektron-pozitron çiftinin belirmesi olasılığından daha düşüktür (bir protonun kütlesi bir elektronun kütlesinin neredeyse 2000 katı kadardır); fakat prensipte bir sınır yoktur. Yeterince uzun süre beklerseniz her tür nesnenin bir sanal parçacık olarak görünmesini beklemelisiniz; peynirden yapılmış tavşanların bile.

"Anlaşıldı, sanal parçacıklar elektronların fotonlarla etkileşim kurma biçimini etkiliyor. Çok mühim. Neden umrumda olsun ki?"

"Bu Feynman diyagramlarındaki fotonlar herhangi bir elektrik ya da manyetik etkileşimi temsil edebilir. Bu diyagramlar başka bir elektronla ya da bir protonla etkileşim içinde olan bir elektronu betimleyebilir ve bu da hep olur."

"İyi, ama neden bahsettiğine dair hiçbir fikrim yok."

"Bak şimdi, kuantum elektrodinamiğiyle uğraşıyorsan etkileşimlerden parçacıkların alışverişi olarak bahsedersin. Birbirini

iten iki elektron bunu, birbirlerine bir foton geçirerek yapar; biri bir foton salar, bu foton öbürüne gider, o da bu fotonu yutar. Yutma ve salma momentumu değiştirir ve biz de bunu iki parçacığı ayıran bir kuvvet olarak görürüz."

"Bu kulağa biraz karmaşık geliyor. Neden meseleyi bu şekilde düşüneyim ki?"

"Matematiksel olarak daha uygun olduğu anlaşılıyor da onun için. Bunu, hiçbir şeyin ışıktan hızlı hareket edemeyeceğini kurama dahil etmenin bir yolu olarak da görebilirsin. Elektrik kuvvetlerine ilişkin, Einstein'dan önce geliştirilmiş olan tabloda, bir elektronun konumunu değiştirdiğinde ne kadar uzakta olursa olsun diğer elektron üzerindeki kuvvetin de anında değişmesi gerekiyordu. Bu da hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı aktarılamayacağını söyleyen görelilik kuramına ters düşer."

"Ya, bak bu bir sorun."

"Haklısın. Ama kuvvetlerin, bir parçacıktan diğerine geçen fotonlardan kaynaklandığını düşünürsek sorunun icabına bakmış oluruz. Fotonlar ışık hızıyla yol alır ve kuvvet de fotonlar oraya ulaşıncaya kadar değişmez."

"Yani bu diyagramlardaki fotonlar..."

"Elektronun bir mıknatısla ya da elektrik alanıyla etkileşiminden kaynaklanan gerçek fotonlar olabilirler; ya da bir başka elektronun saldığı fotonlar olabilirler. Hangisi olursa olsun, etki aynıdır; sanal parçacıkların varlığı etkileşimi değiştirir ve biz de bunu tespit edebiliriz."

"Ama bunu nasıl tespit edeceğimizi hâlâ açıklamadın."

"Oraya geliyorum. Kesip durmazsan..."

Tarihin En Kesin Test Edilmiş Kuramı: Kuantum Elektrodinamiğinin Deneysel Olarak Doğrulanması

Sanal parçacıklar son derece kısa bir süre zarfında, bizim doğrudan gözleyebileceğimizden daha hızlı gelip giderler. Ama elektronların sanal parçacıklarla etkileşimleri, kendi etkileşim biçimlerini değiştirdiği için bu parçacıkların var olduklarını biliyoruz. Etki küçücüktür; ama onu ölçebiliriz ve ölçümler deneysel gözlemlerle on dört ondalık basamağa kadar uygunluk göstermektedir. Bu deneyler kuantum elektrodinamiğinin doğru olduğunu kanıtlamakla kalmazlar; milyar dolarlık parçacık hızlandırıcılar *kullanmaksızın* yeni atomaltı parçacıkların varlığını tespit etmenin de bir yolunu sunarlar.

Peki, işleyiş nasıldır? Sanal parçacıklar çok kısa bir süre için var olduklarından, belli bir elektron için birçok olasılıktan hangisinin gerçekleştiğini bilemeyiz. Kuantum mekaniği bize bir parçacığın kesin durumunu bilmiyorsak bütün olası durumların bir bileşiminde bulunduğunu söyler; daha önceki bölümlerde tartıştığımız üzere bir süperpozisyon durumunda. Bu yüzden, bir elektronun bir elektrik ya da manyetik alanla etkileşiminin etkisini hesapladıklarında fizikçilerin bu süreci betimleyen bütün olası Feynman diyagramlarını hesaba dahil etmeleri gerekir.[9]

Bir anlamda elektron A noktasından B noktasına geçerken aynı anda A'dan B'ye giden bütün olası yollardan geçer. Tek bir gerçek fotonu yutar, sonra sanal bir foton salıp onu yeniden yutar ve bu sanal foton bir elektron-pozitron çiftine hem döner hem dönmez, bunun gibi. Bu süreçlerin hepsi de olasıdır; bu yüzden

---

9- Elbette ki *olabilecek* sonsuz sayıda şey vardır; bu yüzden de sonsuz sayıda olası diyagram. Fakat pratikte diyagram ne kadar karmaşık olursa cevaba katkısı da o kadar az olur; bu yüzden kuramsal fizikçilerin sadece, deneyin kesinliğini karşılamaya yetecek kadar sayıda diyagramı toplamaları gerekir.

hepsi de Feynman diyagramlarının süperpozisyonuna katkıda bulunur.

Bunu düşünmenin bir başka yolu, gerçek bir fotonun tek bir fotonla etkileşim içine girdiğini hiç görmediğimizin üstünde durmaktır; gördüğümüz şey daha ziyade, birçok kere tekrarlanmış etkileşimlerin toplam etkisidir. Bu etkileşimlerin her birini ayrıntılı olarak izleyebilseydik çoğu kez elektronun fotonu yuttuğunu, sanal işlerin olmadığını görürdük. Belki on binde bir kez elektronumuz sanal bir foton salardı. Sanal foton, on binde bir sanal bir elektron-pozitron çifti yaratırdı ve böyle devam ederdi. Bu farklı süreçlerden birine her rastladığınızda bu süreç toplam enerjiyi küçük bir miktar değiştirirdi ve bunun değerlendirmeye alınması gerekirdi.

Bu bakış açısına göre, elektron sokakta yürüyen bir köpek gibidir. Köpeğin belli bir bitkiyi koklamak için durma olasılığı çok azdır;[10] ama bir banliyö caddesinin kenarlarında onlarca bitki vardır, içlerinden biri mutlaka büyüleyici bir koku saçıyor ve daha fazla incelenmeyi hak ediyordur. Tasmayı tutan insanın yürüyüşü planlarken bu ertelemeyi dikkate alması gerekir.

Gerçek bir elektronun etkileşimlerinin her birini, sanal parçacıkların kaç kere etkileşime dahil olduğunu belirleyecek kadar ayrıntılı inceleme becerisine sahip değiliz; tıpkı köpeğin hangi bitkileri koklamak için duracağını kesin olarak tahmin etme becerisinden yoksun olduğumuz gibi; ama bunun etkileşim üzerindeki etkisinin bir modelini çıkarabiliriz. Feynman diyagramlarının toplanması, elektronun enerjisinde gerçek bir foton yutmaktan ileri gelen *ortalama* değişimi hesaplamak olarak düşünülebilir. Ardından, sanal parçacıkların dahil olduğu ya da olmadığı süreçlerle birçok fotonun yutulmasının toplam etkisini, aynı ortalama enerjiyle bir dizi yutulma olarak betimleriz; tıpkı bir köpe-

10- Bir basset hound değilse tabii; eğer öyleyse *her şeyi* koklamak isteyecektir.

ğin ilerlemesini ortalama bir blokta üç kez duracağını söyleyerek betimlediğimiz gibi. Köpeğimiz bazı bloklarda beş kere durabilir, bazılarında sadece bir kere durabilir; ama bütün yürüyüş boyunca bunun etkisi her blokta üç kere durmuş olmasının etkisiyle aynıdır.

Bunu, ister bütün olası yolların aynı andaki bir süperpozisyonu ister ortalama etkileşimin tek tek birçok etkileşimin ayrıntılarını kapsamak için kullanılması olarak düşünün, sanal parçacıkların etkisi, bir elektronun bir manyetik alanla etkileşimine baktığımızda kendisini gösterir. Elektronların (ve başka bütün maddi parçacıkların) kuzey ve güney kutupları olan minicik mıknatıslar gibi davranmalarına neden olan, "spin" denilen bir özellikleri vardır.[11] Kutupları manyetik alanla uyumlu olan bir elektronun enerjisi, kutupları ters yönü gösteren bir elektronun enerjisinden çok küçük bir oranda farklıdır.

Manyetik bir alanda, bu haller arasındaki enerji farklılığı, elektronun jiromanyetik oranı ya da g-faktörü denilen bir rakama dayanır; bu rakam temelde size belli bir "spin" sayısı için ne kadar büyük bir mıknatıs elde edeceğinizi söyler. En basit kuantum elektron kuramı, bu oranın değerinin tam olarak 2 olması gerektiğini söyler; hiç sanal parçacık olmadığında bu değeri alırsınız. Sanal parçacıkların katkısı sayesinde, asıl değer azıcık daha yüksektir.

Bu değer, olağanüstü bir kesinlikle ölçülebilir. 2008'de Harvard'dan Gerald Gabrielse başkanlığında bir fizikçi ekibi, bir Penning kapanında tutulan tek tek elektronların kullanıldığı deneylerde, o zamana kadarki en doğru elektron g-faktörü ölçümünü gerçekleştirdi. Gözlemledikleri deneysel değer şuydu:

11- Bu özelliğe "spin" adı verilmesinin nedeni, elektron dönen bir elektrik yükü topu olsaydı göreceğiniz şey yüzündedir. Elektronlar kelimenin tam anlamıyla dönmezler, ama bu özellik için dönmeleri halindeki matematiğin aynısı geçerlidir.

$$g = 2{,}00231930436146 \; + - \; 0{,}0000000000056$$

Vardıkları sonucu, yukarıda anlattıklarımızdan daha karmaşık süreçleri içeren neredeyse 1000 ayrı Feynman diyagramının toplanmasını gerektiren bir kuantum elektrodinamiği hesaplamasının[12] sonucuyla karşılaştırdılar; kuram ve deney mükemmel bir uyum gösterdi; on dört ondalık basamağa kadar bir uyuşma vardı. İlk bakışta bu fikir ne kadar tuhaf görünürse görünsün, sanal parçacıkların var olduğunu söylerken kendimizden emin olmamızın sebebi budur.

Bu uyuşma son derece etkileyici olsa da bir *uyuşmazlık* daha da ilginç olurdu. Elektronun g-faktörü sadece sanal fotonların ve sanal elektron-pozitron çiftlerinin etkilerini içerir; ama müon (elektrona benzeyen, ama ondan daha kütleli olan bir parçacık tipi) için aynı nicelik başka birçok daha ilginç sanal parçacığın etkisini gösterir.[13] Müonun g-faktörüne ilişkin son ölçümler, deneysel değer ile kuramsal tahmin arasında küçük bir farklılık olduğunu göstermektedir. Bu farklılık sadece bir hesaplama ya da ölçüm hatası olabilir; veya hesaplamalara dahil edilmemiş, parçacık fiziğindeki standart modelde yer almayan yeni bir parçacığın varlığına işaret ediyor olabilir. Henüz kesin bir şey söylemek için çok erken; fakat bu farklılık başka ölçümlerde de varlığını korursa standart modelin ötesindeki fizik için birçok kuramın ilk deneysel testi olabilir.

Elbette ki peynirden yapılmış sanal tavşancıkların etkilerini görmeye başlamak için deneycilerin alması gereken çok yol var. Ama peynirden tavşanlar mümkün olsaydı bunların oralarda bir

---

12- Cornell'de Toichiro Kinoshita'nın grubunun gerçekleştirdiği başlı başına etkileyici bir başarıdır bu.

13- Müon g-faktörü hesaplamaları sanal müonları, tau parçacıklarını, kuarkları ve glüonları içerir; bunlar bilinen atomaltı parçacık tiplerinin büyük bölümünü oluşturur.

yerlerde olmaları gerektiğini bilirdik.

"Peki, o zaman 'Kuantum mekaniği kuramlar tarihinde en doğru biçimde sınanmış kuramdır' derken ne demek istiyorsun?"

"Ben *öyle* demedim..."

"Her ne dediysen! Hep aynı şeyi söylüyorsun, gerçekten de hava atıyormuşsun gibi geliyor kulağa."

"İyi. Bir daha göbeğini kaşırsam... Her neyse, evet, demek istediğim o aslında. Elektronun g-faktörünü on dört ondalık basamağa varıncaya kadar tahmin etmekte kuantum elektrodinamiği kullanılmıştır ve elde edilen değer deneysel ölçümlerle mükemmel bir uyum göstermiştir. Kuantum elektrodinamiği, olağan kuantum mekaniğinin, görelilik hakkında düşünmeyi gerektiren durumları içeren nispeten doğrudan uzantısıdır."

"Başka ne faydası var ki?"

"Daha önce söylediğim gibi, sanal parçacıklar gibi her türden farklı şeyle karşılaşabilirsin. Bunlara kuramcıların tahmin edip henüz gözlemlemediği parçacıklar da dahildir; bu parçacıklar gerçekten varlarsa sanal parçacıklar olarak boy göstereceklerdir."

"E bunun ne faydası var?"

"Bu varsayımsal parçacıkların bazıları, bildiğimiz parçacıkların hiçbiriyle mümkün olmayan etkileşimleri mümkün kılacaklardır. Müon g-faktörünün yanı sıra elektronun 'elektrik dipol momenti' vardır. Doğru türde parçacıklar var olurlarsa, bunlar, elektronun atomlar ve moleküllerin içindeki elektrik alanlarıyla etkileşime girme biçimlerini değiştireceklerdir. Deneylerde izinli durumlardaki küçük değişimi lazerlerle tespit etmek mümkün olabilir."

"Yani, bu dipol momenti mi her ne karın ağrısıysa onu görünce yeni parçacıkların var olduğunu mu anlarsın?"

"Tabii, *görmezsen de* bazı parçacık tiplerini ortadan kaldırabilirsin. Bir elektronda kimsenin bir elektrik dipol momenti görmemiş olması, kuramcıların kullanmayı sevdiği bazı basit model-

leri ortadan kaldırmıştır. Yeni deneylerde bir şeyin görülmemesi kuramcıların başını gerçekten ağrıtabilir."

"Çok iyi."

"Çok iyi tabii, çünkü bunlar milyar dolarlık parçacık hızlandırıcılarla değil masa başında yapılan deneyler. Berkeley'de, Yale'de, Washington'da, Colarado'da bu deneyleri yapan birçok grup var; Büyük Hadron Çarpıştırıcısı işlemeye başlayıncaya kadar, belki onun da ötesinde gerçekten yeni bir şeyler öğrenme konusunda en iyi fırsatı bunlar sunuyor."

"Tabii bunların hiçbirinin gerçekten önemli şeylere bir faydası yok."

"Neymiş o?"

"Bana peynirden bir tavşan bulmak."

"Eh, ne diyebilirim ki? Bazı alanlarda fizikçilerin kat etmesi gereken hâlâ uzun bir yol var."

"Ben de onu diyecektim."

X

Kötü Sincaplara Dikkat: Kuantum Fiziğinin Kötüye Kullanılması



Sincap geçirmez kuş yemliğine yem koyuyordum ki başımın üstünde incecik bir ses duydum. "Şşşt! Hey, insan kardeş!"

Bir ağacın dalına tünemiş, bana bakan bir sincap. Etrafıma bakınıyorum, ama Emmy bahçenin öbür tarafında; büyük meşe ağacının dibini kokluyor. "Ne istiyorsun?" diye soruyorum.

"Bana o yemlerin birazını vermeye ne dersin?"

"Hiç sanmıyorum. Yüzünde ne var senin? Keçi sakal mı o?"

"Sahte canım. Köpeğin kafasını karıştırmak için takıyoruz; başka bir boyuttan geldiğimizi sanıyor. Baksana, o zaman biraz yem *satmaya* ne dersin?"

"Bir sincap kuş yemini neyle alır ki?"

"Bedava enerjiye ne dersin, ha?" Sahte keçi sakalına, kabarık kuyruğuna, öne çıkmış dişlerine rağmen bir şekilde kendinden emin görünmeyi başarıyor.

"Bedava enerji mi?"

"Tabii ya! Bildiğimiz suyla neredeyse sonsuz miktarda enerji elde etmek için ne yapman gerektiğini anlatabiliriz. Biraz kuş yemine değer, ha?"

"Gerçekten. Bedava enerji."

"Bildin. Su moleküllerinden sıfır-noktada titreşimsel enerji alıyor; onları sıradan moleküllerden daha düşük bir enerji halinde bırakıyoruz. Bu enerjiyi doğruca elektriğe çevirebilir; ampulleri yakmak, bilgisayarları ya da kuş yemi yapan makineleri çalıştırmak için kullanabilirsin." Yakından baktığımda şu sahte keçi sakalın belirgin bir biçimde iple tutturulduğunu görüyorum.

"Gerçek olamayacak kadar iyi geliyor kulağa. Ucunda ne var bunun? Zehirli atık ürünler mi?"

"Hayır, hayır; tek atık durgun su. Aslına bakarsan sudan daha iyi. Süper su!"

"Neymiş o kadar süper olan?"

"Bak şimdi, farklı bir kuantum halinde ya? Bu yüzden de özel bazı özellikleri falan var. İçersen hastalıklarını iyileştirebilirsin."

"O nasıl oluyormuş?"

"Bak, içiyorsun bu suyu; sonra dalga fonksiyonunu sağlıklı bir halde ölçmeye odaklanıyorsun. Doğru düzgün yaparsan mükemmel bir sağlığa kavuşuyorsun."

"Deme."

"Yaa! Aynen öyle. Bazı atölye çalışmalarımız, derslerimiz falan var. Ben yüz altı yaşındayım, sağlığım da mükemmel. Haftada bir avuç kuş yemine senin de bu sırrı edinmeni sağlayabiliriz."

"Hı hı." Köpeğim hâlâ bahçenin öbür tarafında, tavşan bulmak için çalılıkların arasına bakınıyor.

"Bir kuantum bilgisayarını çalıştırmak için de kullanabilirsin, ama o kuş yeminden fazlasına patlar. Haftada bir kavanoz fıstık ezmesine, kredi kartı işlemlerinin şifresini kırmak için gereken bir kuantum bilgisayarının şemasına sahip olabilirsin."

"Ooo!"

"Ya. Çok iyi, değil mi?"

"Köpek haklıymış. Siz *kötü sincaplarsınız.*"

"Sanki nasıl yapıldığını bilsen yapmazmışsın gibi. Şu kuş yemine ne dersin?"

"Tabii, sana biraz kuş yemi vereceğim." Yere, ağacın gövdesinden yaklaşık bir buçuk metre uzağa bir avuç kuş yemi koyuyorum.

"Teşekkürler ahbap!" diyor sincap, ağaçtan inerken. "Kralsın."

"Lafı bile olmaz," diyorum, ağaçla sincabın arasına girerken. "Emmy!" Bahçenin öbür yanından kafasını kaldırıyor. "Bak! Kötü bir sincap!"

"Ooo!" Bahçeyi uçarcasına aşıyor, dişleri parlıyor. Sincap ağaca koşmaya çalışıyor; ama yolunu kapatıyorum. Dönüp bahçenin arka tarafındaki akçaağaca doğru kaçıyor; köpek dişlerini kuyruğuna takmış.

Çimenlerin üzerinde bir şey görüyorum; eğilip alıyorum: Küçük bir sahte keçi sakal. Eve dönerken yol üzerinde çöp kutusuna fırlatıyorum.

Önceki bölümlerde kuantum mekaniğinin birçok tuhaf ve harika özelliğinden bahsettik. Dalga-parçacık ikiliği, kuantum ölçümü, EPR korelasyonları, sanal parçacıklar; kuantum kuramının birçok yönü gündelik deneyimlerimize ters düşer; o kadar ki kuantum mekaniği sihirmiş gibi görünmeye başlar. Normal kuralların hiçbiri geçerli değilmiş gibi görünür; kesinlikle her şey mümkünmüş gibi gelebilir.

Kuantum mekaniğiyle ilgili yaygın bir yanlış anlamadır bu; birçok yerde tekrarlandığını görebilirsiniz. Google'da biraz zaman harcarsanız, hiçbir şeyden enerji üretmenin, sağlığınızı iyileştirmenin, hatta zenginlik ve güç kazanmanın "kuantum" yöntemlerini öneren onlarca siteyle karşılaşabilirsiniz: Kuantum mekaniğini sihirmiş gibi sunarak para kazanan çok fazla insan vardır.

Ama kuantum mekaniği sihir değildir. Ne kadar olasılık dışı ya da şaşırtıcı görünürse görünsün kuantum mekaniği genel fizik ilkelerine uyması gereken bilimsel bir kuramdır. Bir fenome-

nin ya da aygıtın tanımındaki "kuantum" kelimesi, o fenomenin ya da aygıtın hiçbir şeyden enerji yaratmasını ya da ışıktan hızlı mesaj göndermesini mümkün kılamaz. Bu ilkeler evrenin yapısının derinlerindedir. Kuantum mekaniği bu kurallara uygun olmakla kalmaz, bazı durumlarda bu kurallar kuantum davranışından doğar.

Kuantum mekaniğinin birçok tahmini, dünyanın nasıl işlediğine dair gündelik sezgilerimize ters düşüyormuş gibi görünse de sağduyunun bütün kurallarını askıya almazlar. Özellikle de dünyayla başa çıkma konusunda en önemli sağduyu kuralını aşmazlar: Bir şey kulağınıza gerçek olamayacak kadar iyi geliyorsa, neredeyse kesinlikle öyledir.

Bu kitabın büyük bir bölümünü kuantum kuramının harika yönlerinden bahsetmeye harcadık; ama sözlerimi uyarıcı bir notla bitirmek istiyorum. Kuantum mekaniğinin sahte bir versiyonunu sihirmiş gibi satan; en çılgın gerçek dışı hayallerimizin bile ötesinde sonuçlar vaat eden birçok kişi var. Bunların bazıları dolandırıcılık sanatçıları; bazılarıysa iyi niyetli, fakat aldanmış insanlar; gelgelelim hepsi de yanılgı içindeler. Dolandırıcıları kafası karışıklardan ayırmak zor; ama kuantum kuramının sahte versiyonlarını ayırt etmek zor değil; bu bölümde de en olağan problemlerin birkaçına dikkat çekeceğim.

Bedava Bir "Kuantum" Yemeği: Bedava Enerji

Kuantum kuramını kötüye kullanan dolandırıcılık sanatçılarının faaliyet gösterdiği başlıca iki alandan biri "bedava enerji"dir. Bedava enerji dolandırıcıları her zaman, küçük bir miktar işe karşılık büyük miktarlarda enerji üretecek bir plan geliştirdiklerini iddia ederler. Bu plan çok çeşitli biçimler alabilir; ama temel cazibe

noktası her zaman aynıdır: Çok küçük bir miktarda işe karşılık çok büyük miktarda elektrik alırsınız. Yapmanız gereken tek şey, sistemin prototipini çalıştırmak için küçük bir nakit yatırımında bulunmaktır; sonra da çok geçmeden elektrik şirketinin avcundan kurtuluverirsiniz.

Bu, daimi bir hareket makinesi icat etme iddiasında bulunmaktan başka bir şey değildir; bilim insanları daimi hareket makineleri yapmanın imkânsız olduğunu yüzlerce yıldır biliyor. Kuantum mekaniği bu sonucu değiştirmez.

"Kuantum" daimi hareket makineleri için getirilen en yaygın asılsız açıklama, böyle bir makinenin şu veya bu sistemdeki sıfır noktası enerjisinden yararlandığıdır. Bu sıfır noktası enerjisi, kuantum fiziğinin, mümkün olan en düşük seviyedeki enerji halindeki bir sistemde bile bulunduğunu söylediği enerjidir. Bir kuantum sisteminden alabileceğiniz bütün enerjiyi aldığınızda; kinetik enerjiyi mümkün olan en düşük değere indirip sistemi potansiyel enerjiyi artıracak etkileşimlerin dışına çıkardığınızda sistemde hâlâ bir miktar enerji kalır.

Göz boyayıcılar, bu sıfır noktası enerjisinden kullanılacak bir kaynakmış gibi bahsetmeye bayılır. "Orada hâlâ enerji var," derler; "bizim aygıtımız da bu enerjiyi kullanarak daimi hareket makinesinin çalışmasını sağlıyor."

Ama ikinci bölümde sıfır noktası enerjisinin, madde esasen dalgaya benzer olduğu için, kuantum parçacıklarının her zaman bir dalga boyu olması gerektiği için var olduğunu gördük. Bir sistemin enerjisinin gerçekten sıfır olabilmesi için, sistemin belli bir konumda kusursuz bir hareketsizlik içinde olması gerekir; bir dalgayla tanımlanan bir sistem için bu imkânsızdır. Sıfır noktası enerjisi, tıpkı Heisenberg belirsizlik ilkesi gibi maddenin esasen dalga niteliğine sahip olmasının bir sonucudur. Nasıl ki belirsizliğin dayattığı sınırları silmenin bir yolu yoksa yararlı işler yapabilmek için sıfır noktası enerjisini kullanmanın da bir yolu yok-

tur. Sıfır noktası enerjisini kullanmaya çalışmak bir fotonun yarısını istemek gibi bir şeydir; hiçbir anlamı olmayan bir istektir.

Düzmece kuantum kuramıyla bedava enerjinin bugüne kadarki en başarılı savunucusu herhalde Black Light Power adlı şirket olmuştur. Maryland Üniversitesi'nden Bob Park ve Amerikan Fizik Cemiyeti, bu şirketin kurucusu Randell Mills'in iddialarındaki asılsızlıkları ortaya dökmeye neredeyse yirmi yıl harcamıştır; Park'ın *Voodoo Science: The Path from Foolishness to Fraud* (Oxford, 2000) adlı kitabı bu iddialar üzerinedir. Fakat Park'ın bütün çabalarına rağmen Black Light Power şirketi hâlâ faaliyetlerini sürdürmekte, dikkat çekici bir enerji üretim sürecini pazarlamaktadır. Şirketin web sitesine göre bu süreçte, "hidrojen atomlarının elektronları bir katalizör tarafından, kesirli kuantum sayılarına denk gelen düşük enerji seviyelerine geçmeye sevk edilirken (yani, her atomun çekirdeği etrafında düşük yörüngelere inerken) enerji salınır." "Hidrinolar" denilen bu gizemli, düşük enerjili atomların her türden sihirli özelliğe sahip olduğu, yeni yüksek voltajlı pilleri ve mucizevi ışık kaynaklarını mümkün kıldığı iddia edilir. (Bunların hiçbiri henüz yoktur; ama bugün yarın yapılacakları vaat edilir.)

Bütün bu sözlerin etkileyici bir bilimsiliği var; ama bir köpek bile zırva olduğunu söyleyebilir. Hidrojen evrendeki en basit atomdur; bir tek protonun yörüngesinde dönen bir tek elektrondan oluşur. Hidrojenin ilk kuantum modeli 1913'te Niels Bohr tarafından ortaya konmuş; 1920'lerde Schrödinger denklemi kullanılarak tam bir kuantum incelemesi geliştirilmiştir. Kuantum elektrodinamiği hidrojene ilk kez 1947'de uygulanmıştır; hidrojenin modern kuantum elektrodinamiği modelleri de deneysel sonuçlarla, tıpkı elektron g-faktörü ölçümlerinde görülen kesinlikte bir uyum göstermektedir. Hidrojen atomu evrende en iyi anlaşılmış, en kesin olarak sınanmış sistemlerden biridir.

Modern fizik hidrojende "meydanda olmayan" hallere imkân

tanımaz. Bu gibi hallerin var olabilmesi için temel fizik anlayışımızın, kuantum elektrodinamiğinde gördüğümüz üzere, deneyler ile kuram arasında on dört ondalık basamakta uyumu yakalamayı imkânsız kılacak kadar yanlış olması gerekir.

Sık sık atıfta bulunulan bir başka "kuantum" bedava enerji kaynağı "boşluk enerjisidir." Bu, boş uzayın; yani kuantum elektrodinamiğinin gösterdiği üzere içinde sanal parçacıkların var olması gereken, sürekli belirip kaybolan denizin sıfır noktası enerjisini kullanmayı amaçlayan sıfır noktası enerji planının bir başka versiyonudur.

"Boşluk enerjisi" planları "hidrino" enerjisinden daha mümkün değildir. Boş uzayda sanal parçacıklar biçiminde enerji vardır; ama bu parçacıklar bir saniyenin minicik bir bölümünde rastgele belirip kayboluverir. İstek üzerine elektronların belirmesini sağlayamayacağımız gibi, işe yarasınlar diye ortalıkta kalmalarını da sağlayamayız. Boşluk enerjisi elektronlar ve başka parçacıklar üzerinde küçük, ama gerçek bir etkiye sahiptir; gelgelelim kullanılabilecek bir enerji kaynağı değildir.

Daimi hareketle ya da "bedava enerji"yle ilgili bir iddia esasen hiçbir şeye karşılık bir şey almanızı öngörür. Her köpek, derinlerinde bir yerde bilir ki bu mümkün değildir; herhangi bir numara yapmadan ödül almanız imkânsızdır. "Kuantum" lafını ortaya saçmak temel gerçeği değiştirmez: Hiçbir şey koymadan bir şey alamazsınız. Aksini iddia eden biri bir şey satıyordur.

"Sanırım Hawking ışınımında olduğu gibi sanal parçacıkların gerçek olabildiğini söylemiştin."

"Onun gibi bir şey demiştim. Fikir şudur: Bir elektron ve pozitron çifti tam bir kara deliğin kenarında belirebilir; öyle ki biri kara deliğin içine düşer, diğeri de kurtulur."

"Doğru. O zaman, elektronlar hiçbir şeyden ortaya çıkıyor."

"Yanlış. Sanal bir elektron Hawking süreciyle gerçek olursa kara delik onu oluşturmak için kütlesinden küçük bir parça *kay-*

beder. Gerçek elektronu yapan enerji boşluk enerjisinden değil, kara delikten gelir; kara delik her seferinde bir parçacığa enerjisini vererek yontulup ufalır."

"O zaman sanırım bir enerji kaynağı olarak pek işe yaramıyor, ha?"

"Hayır, hem de hiç. Bir kara deliği çevreleyip kontrol edebildiğini varsaysan bile, başka her şey gibi o da enerji üretim süreciyle tükenip gidecektir. Bedava yemek diye bir şey yok."

"Evet var. Sen benden hiç yemek ücreti kesmiyorsun. Kahvaltı ücreti de, akşam yemeği ya da atıştırmalıklar için de..."

"Sen sevimli olup ekmeğini kazanıyorsun."

"Ah tabii. Bir de evi kötü sincaplardan koruyorum."

"O da var. Hazır lafı açılmışken..."

Sağlıklı Olmaya Giden Yolu Ölçmek: "Kuantum İyileştirme"

Kuantum mekaniğinin suiistimal edildiği diğer alansa "alternatif" tıptır. Kitapçılar ve internet kuantum mekaniğini sağlık, zenginlik ve uzun ömrün anahtarı olarak ileri süren insanlarla doludur.

Bu iddiaların en yaygın biçimi kuantum ölçümüyle ilgilidir. Göz boyayıcılar kuantum kuramında, durumların ölçülünceye kadar kesin olmadığına dikkat çekerler. Sonra da sağlığın anahtarının, kendinizi sağlıklı olarak ölçmekte yattığını savunurlar. Bu düşünme biçimine göre kendiniz üzerinde bir kuantum Zeno etkisi deneyi gerçekleştirerek sonsuza dek yaşayabilirsiniz; sağlığınızın her zaman iyi olduğunu ölçerseniz, kuantum ölçümü hiçbir zaman hastalanmamanızı sağlar.

Bu kuantum sahtekârlığının en iyi örneği, *Kuantum Healing* (Bantam, 1990 / *Kuantum İyileşme*; İnkılap, 5. basım, 2010) adlı bir kitabı bile bulunan Deepak Chopra'dır;

ternatif tıp kitapları dizisinin ilki olmuştur. "Kuantum iyileştirme" nedir diye mi soruyorsunuz? Chopra kendisiyle 1995'te yapılan bir söyleşide bir paragraflık bir açıklama yapıyor:

> Kuantum iyileştirme, bedenzihni kuantum düzeyinden hareketle iyileştirmektir. Bu, duyusal düzeyde tezahür etmeyen bir düzeyden hareket etmek anlamına gelir. Bedenlerimiz nihayetinde enformasyon, zekâ ve enerji alanlarıdır. Kuantum iyileştirme yanlış yöne giden bir fikirde bir düzeltme yapabilmek için enerji enformasyonu alanlarında bir değişim yapmayı gerektirir. Kuantum iyileştirme, bilincin bir biçimini, yani zihni iyileştirerek bilincin bir başka biçiminde, yani bedende değişiklikler yapmayı içerir.[1]

Chopra kulağa bilimsel gelen bir sürü terim kullanıyor; ama söyledikleri laf salatasından ibaret. *Uzay Yolu*'nun eski bölümlerindeki teknosafsatanın bilimsel geçerliliği var bu sözlerde; tek yapmadığıysa bir şeyin "kutupsallığını tersine çevirmek"ten bahsetmek.

Kendisi bu fikirleri alt başlığında "Yaşlanmaya Karşı bir Kuantum Alternatifi" vaat eden *Ageless Body, Timeless Mind* (Harmony, 1994 / *Yaşlanmaz Beden, Sonsuz Zihin*; İnkılap, 1996) adlı kitabında genişletir. Fikirlerinin fiziksel temellerine dair açıklamaları, tarih konusunda etkileyici bir cehalet içinde olduğunu gösterir: "Einstein bize başka bütün maddi nesneler gibi fiziksel bedenin de bir yanılsama olduğunu, onu yönlendirmeye çalışmanın gölgeyi yakalayıp özü kaçırmak olacağını öğretti," gibi cesur bir iddiada bulunur (orijinal, s. 10). Bu sözler, yedinci bölümde de gördüğümüz üzere, Einstein'ın görüşlerinin neredeyse tam tersini yansıtmaktadır. Kuantum belirsizliği fikri Einstein'ı derinden rahatsız ediyordu; Chopra aslında hiçbir şeyin var olmadığını sa-

1- Bu söyleşi internette http://www.healthy.net/scr/interview.asp?ID=167 adresinde bulunabilir, 2008'de alınmıştır.

vunarak bu fikri yeni bir düzeye taşır:

> Maddi dünyada mutlak bir nicelik olmadığından, "orada" bağımsız bir dünya olduğunu söylemek bile hatalıdır. Dünya, onu kaydeden duyusal aygıtın bir yansımasıdır (...) Gerçekten "orada" olan, sizin tarafınızdan, algılayan tarafından yorumlanmayı bekleyen ham, biçimlenmemiş verilerdir. Fizikçilerin deyişiyle "kökten muğlak bir akışı olan bir kuantum çorbası" alırsınız,[2] duyularınızı kullanarak bu çorbayı katı üç boyutlu dünyada pıhtılaştırırsınız. (Orijinal s. 11)

Tekbenciliğe doğru bu alçalma, herhalde pıhtılaşmış çorba pek cazip olmadığından kulağa "rahatsız edici" gelse de Chopra bunu bir sorun değil, bir özellik olarak görür ve şöyle yazar: "*Algınızı değiştirerek* bedeniniz dahil dünyanızı değiştirebileceğinizi fark etmek inanılmaz derecede özgürleştiricidir." (Orijinal, s. 11-12) Başka bir deyişle, hiçbir şey gerçekten var olmadığından pekâlâ sağlıklı, zengin ve genç olabilirsiniz. Bu sadece bir "algı", yani ölçüm meselesidir.

Sağlığın iyi olmasını sağlamak için kuantum ölçümünün etkin doğasına başvurarak "kuantum iyileştirme" fikri, iki büyük sorundan mustariptir. İlk sorun, Chopra ve diğer yazarların kuantum fikirlerini kuantum etkilerini gösteremeyecek kadar büyük sistemlere uygulamalarıdır. Bu kitap boyunca tekrar tekrar gördüğümüz üzere, kuantum etkilerini ayırt edebilmek son derece zordur; incelenen sistem ne kadar büyük olursa kuantum etkilerini görmek de o kadar zor olur. Şimdiye kadar bir kuantum süperpozisyonu durumunda görülmüş en büyük nesne, yaklaşık bir milyar elektrondan oluşan bir topluluktur (dördüncü bö-

---

2- Burada çoğul olarak kullanılan "fizikçiler" muhtemelen haklı ve yerinde bir tabir değildir; "kökten muğlak bir akışı olan kuantum çorbası" fizikte yaygın bir terim değildir. Göründüğü kadarıyla bu terimi kullanan tek gerçek fizikçi neyle ilgili olduğunu tahmin edebileceğiniz "Kuantum Tantra"yı ileri süren Nick Herbert'tır.

lüm); kuantum Zeno etkisiyse sadece tek tek parçacıklarda görülmüştür (beşinci bölüm).

Fakat asıl büyük sorun, kuantum ölçümlerinin esasen rastgele olmasıdır. Bir ölçüm yapılana kadar bir kuantum sisteminin durumu belirsizdir; tek tek ölçümlerin sonucu ise tahmin edilemez. İster dalga fonksiyonunun tek bir değere çöktüğü Kopenhag yorumunu benimseyin, ister sürekli genişleyen bir dalga fonksiyonunun tek bir dalını algıladığınız çoğul dünyalar yorumunu tercih edin, ister Chopra'nın pıhtılaşmış çorba yorumunu beğenin: Bir kuantum ölçümünün nasıl sonuç vereceğini önceden bilmenin bir yolu yoktur.

Evrenin dalga fonksiyonunun, bütün köpeklerin sağlık durumlarının mükemmel olduğu, sonsuz bir abur cubur ve yavaş koşan tavşan kaynağının tadını çıkardığı bir dalı pekâlâ olabilir; ama o evrene ulaşmak için ölçüm sonuçlarını etkilemenin bir yolu yoktur. Meditasyonun bir yararı olmaz, olumlu düşünmek işi halletmenizi sağlamaz, ilaçlar işe yaramaz; evrenin kuantum yapısını, bir kuantum ölçümünden belli bir sonuç almak için etkilemenin bilinen bir yolu yoktur; şimdiye kadar hiçbir bilimsel çalışma da böyle bir yola dair bir ipucu bulmamıştır. Sırf fena halde istemekle büyük şeyler başarmak mümkün olsaydı fizikçiler kuantum etkilerini göstermekte bu kadar zorlanmazdı; köpekler de hiç biftek, peynir, tavşan eksikliği çekmezdi.

Meditasyon stres düzeyinizi düşürebilir, olumlu düşünceler de ruh halinizi iyileştirebilir; bunların her ikisi de hayattaki durumunuza dair kendinizi iyi hissetmenizi sağlayıp o tavşanı yakalayacak enerjiyi verebilir. Ama bunda kuantumla ilgili bir şey yoktur; evrenin derin yapısına anlamlı bir biçimde adım atıyor değilsinizdir.

"Bak meditasyon konusunda haklısın. Gerçekten de stresimi azaltmamı sağlıyor."

"Sen ne zamandan beri meditasyon yapıyorsun?"

"Her zaman yaparım. Bende Budalık var. Arka bahçede güneşte meditasyon yapmayı seviyorum."

"Ona meditasyon demezler, uyumak o. Gözlerin kapalı oluyor, üstüne bir de horluyorsun."

"O horlama değil... mantra."

"Saçmaladın iyice. Hem senin niye stresin oluyor ki?"

"E benim hayatım çok zor. Oturma odasında mı uyusam salonda mı yoksa büroda mı diye düşünmem gerek. Neden bana bakmadığını, bana neden ödüller vermediğini de takıyorum kafama."

"Peki, bu kadar yeter. Başımı ağrıtıyorsun."

"Meditasyon yapmalısın!"

Dolanıklık Yoluyla Tekinsiz İyileştirme: "Uzaktan İyileştirme"

Kuantum sahtekârlığının bir başka yaygın biçimi, yerel olmamanın (nonlocality) "alternatif" ya da "geleneksel" tıbbın temeli olduğunu iddia etmektir. Bell'in kuramında ve Aspect deneylerinde görülen korelasyonların, gerçekliğin derin, "aşkın" bir düzeyi olduğunu gösterdiği ileri sürülür. Bu düzeyin, bütün canlılar arasında bir bağlantı yarattığı, pratisyenlerin bu bağlantıyı insanlara dokunmaksızın sorunları teşhis etmek, hatta onları iyileştirmek için kullanabileceği söylenir. Her türden duyu ötesi fenomenin temelinin de bu düzeyde olduğu iddia edilir.

Bu fikrin en aşırı versiyonu Jack Angelo'nun kaleme aldığı *Distant Healing* (Sounds True, 2008) gibi kitaplarda bulunur. Angelo kitabında şunları ileri sürer:

Kuantum mekaniğiyle ilgilenen bilim insanları birleşik

alan kuramının kütleçekim, nükleer tepkimeler, elektromanyetik alanlar ve insan bilinci dahil, evrendeki her şeyi birbirine bağladığına inanır. O halde modern fizik uzaktan iyileştirmenin, düşünce biçimlerinin, örneğin fikirler ve enformasyonun bir bilinç ağıyla insanlık ailesinin bir kısmından bir başka kısmına geçebileceği yönündeki bulgusunu desteklemektedir. (Orijinal s. 180-81)

Bunlar da *Uzay Yolu* düzeyinde laflar. Fizikte "birleşik bir alan kuramı" yoktur; hatta birleşik bir alan kuramının yokluğu, modern fiziğin önündeki en büyük güçlüklerden biridir. Birleşik bir alan kuramı olsaydı bile "insan bilinci" onun içereceği unsurlardan biri olmazdı.

Bu fikir Tiffany Snow'un *Forward from the Mind: Distant Healing, Bilocation, Medical Intuition & Prayer in a Quantum World* adlı kitabında (Spirit Journey Books, 2006) daha ayrıntılı bir biçimde, daha hatalı açıklamalarla ete kemiğe büründürülmüş:

> Dolanıklık [bazen yerel olmama da denilir], birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar bir şekilde birbirleriyle irtibat halinde kalan iki parçacık arasında, *ışık hızından daha hızlı* bir sinyalin anında iletilmesidir. Aralarında bir galaksi bile bulunsa parçacıklardan birinin başına gelen şey, dalga biçimli dolanık bağlantı sayesinde anında öbür parçacığın da başına gelir. "Büyük Patlama" kuramıyla evrenin başlangıcına bakarsak (biz de dahil) bütün enerjinin daha en baştan dolanıklaştığını görürüz; dolayısıyla birbirimizden ne kadar ayrı olsak da hepimizin birbirimizde bir çentiği [orijinalde yazıldığı gibi] var. Daha açık bir deyişle birimizin yaptığı *başka herkesi etkiler*.

Snow, sadece bir parça hatalı bir açıklamayla başlıyor; ama paragrafın sonuna doğru hepten raydan çıkıyor.

Yedinci bölümde gördüğümüz üzere dolanıklık gerçekten de dolanık parçacıkların halleri arasında yerel olmayan korelasyon-

ları mümkün kılar. Gelgelelim öncelikle bu korelasyonların yerel etkileşimlerle tesis edilmesi gerekir; örneğin Aspect deneylerindeki fotonlar en başta aynı atom tarafından üretilmişti.

Bu dolanık parçacıklar arasındaki kuantum bağlantısı son derece hassastır; evrenin geri kalanıyla etkileşimler yüzünden kolayca kırılır ve eşevresizliğe yol açar. Fizikçilerin bir saniyenin onda biri kadar süren dolanık bir hal yaratmak için bile çok fazla çalışmaları gerekir. Dolanıklığa dayanan hiçbir bağlantının, Büyük Patlama'nın üstünden geçen on dört milyar yılda ayakta kalması mümkün değildir.

Büyük Patlama'dan bugüne kalan bir dolanıklık olmadığı için, birbirinden ayrı nesneler arasında da içkin bir bağlantı yoktur. Yedinci bölümde tartıştığımız üzere, iki köpeğin hallerinin birbiriyle ilişkili hale gelmesini kolayca düzenleyebilirim; fakat bunu ancak bu köpekleri bir araya getirip birbirleriyle etkileşim kurmalarını mümkün kılarak yaparım. İki köpek her zaman ayrıysa onları dolanıklaştırmanın bir yolu yoktur. Benzer şekilde, insan organlarının kuantum etkileri gösteremeyecek kadar büyük oldukları gerçeğini bir kenara bıraksak bile, söz gelimi, bir hastanın karaciğeri ile bir "şifacı"nın elleri arasında hiç temas olmaksızın bir bağlantı kurmak mümkün değildir.

Dolanıklık homeopatiyi açıklamak için de kullanılır. Homeopati tedavilerinde, az miktarda bitki ya da zehir suya bırakılır ve bitkinin ya da zehrin tek bir molekülünün bile suda kalmayacağı derecede çözündürülür. Bu tedaviyi yapanlar, suyun, başta içine konulan maddenin varlığını "hatırladığını"; onun bazı özelliklerini aldığını, bunun o suyu içecek hastaların iyileşmesini sağlayacağını savunur. Dolanıklık bu "hafıza" etkisi için getirilen bir açıklamadır; su ile bitki ya da zehir arasındaki etkileşimin Aspect deneylerinde görülen korelasyonlara benzer bağlantılar kurduğu ileri sürülür.

Homeopatiye getirilen kuantum-dolanıklığı açıklamasının

zirveye çıktığı nokta, Lionel Milgrom'un çalışmaları olmuştur; Milgrom homeopatinin sadece su ile zehir arasında bir dolanıklığı değil, hasta, pratisyen ve ilaç arasında üç yönlü bir dolanıklığı gerektirdiği (o buna 'HPİ' dolanıklığı der) şeklinde bir kuramlaştırmaya gitmiştir. Milgrom'un kuantum fiziğinin jargonunu ve işaretler sistemini taklit etme konusunda muhteşem bir yeteneği vardır; 2006'daki bir makalesinde de şunları yazmıştır:

> Homeopati ve diğer TAT'larda[3] terapi sürecinin belli özelliklerini resmetmek için kuantum dolanıklığı (ve oradan hareketle enformasyon işleme) kavramlarının kullanılması mümkün olmalıdır. Buna bağlı olarak, homeopati ve diğer TAT'ları kör deneme usulleriyle incelemenin etkileri de böyle bir tablodan sorumlu olmalıdır. Başka bir deyişle çift kör kanıtlamalarda, HPİ dolanıklık halinin her bir bileşeni iki halli bir "makro kubit" olarak düşünülebilir; dolayısıyla homeopatik sürecin makro kuantum "teleportasyon" içerdiği değerlendirmesinde bulunulabilir (...) Gelgelelim yalnızca dolanık hal, sistemin tamamı hakkında enformasyon içerir. Dolayısıyla dolanık durumu kıran her şey mutlaka, sistemlerin fonksiyonlarının sistemin tamamı olarak bütünleşmesi hakkında enformasyon kaybına yol açacaktır. Açıktır ki böyle bir enformasyon kaybı, homeopatinin verimliliğiyle ilgili olarak gerçekleştirilen, ya ilaç ya hasta ya da pratisyenin dolanık terapi bağlamından çıktığı çift kör rastgele kontrol denemelerinde[4] de ortaya çıkacaktır.[5]

3- 'TAT', 'tamamlayıcı ve alternatif tıp' anlamına gelir. Kısaltmalar her şeyin daha bilimsel kokmasını sağlar.

4- Çift kör rastgele kontrol denemeleri, hastanın sınanan tedaviyi ya da plaseboyu almak üzere rastgele seçildiği, hastanın da hekimin de hangisinin plasebo hangisinin ilaç olduğunu bilmediği denemelerdir. Bu testler modern tıp araştırmalarında altın standardıdır.

5- Lionel Milgrom, *Evidence Based Complementary and Alternative Medicine* 4, 7-16 (2006). Alıntılar s. 14'ten.

Bu "kuantum" akıl yürütmenin gerçekten nefes kesici bir uygulamasıdır. Milgrom homeopatik ilaçların iyileştirici etkilerini bu "makro kuantum 'teleportasyon'"a atfetmekle kalmaz; hoş bir mantık judosuyla bu açıklamayı, gereği gibi gerçekleştirilmiş klinik denemelerde homeopatik tedavilerin plaseboların önüne geçememesini açıklamak için kullanır. Görüyorsunuz ya, her şey kuantumdur; bilimsel ilkelerle tutarlı bir tavırla performansı ölçme girişiminde bulunmak her şeyi mahveder. Milgrom standart tıbbi test protokollerinin homeopatiyi ölçmek için kullanılamayacağı, "çünkü bunların, araştırmayı amaçladıkları etkileri ortadan kaldırıyormuş gibi göründüğü" sonucuna varır; etkileyici bir girişimde bulunarak bugün tıbbi tedaviye uygulanan kesin standartları karşılamaktan (muhtemelen tünelleme ya da ışınlanma yoluyla) kaçınmak için kuantum mekaniğine başvurur.

Dolanıklığın homeopatiyi açıkladığı iddiası, tam bir zırvalıktır. Hastalar ve pratisyenler kuantum davranışı gösteremeyecek kadar büyüktür; ayrıca bir solüsyondaki moleküller arasında bir dolanıklık etkileşimi kurulması yolunda küçücük bir olasılık var olsa bile dolanıklık sadece iki sistemin *halleri* arasında bir korelasyondur; bir atom belli bir halde olduğunda bir foton dikey polarize olur ya da bir köpek uyanıksa öbür köpek de uyanıktır. Bu, bir sistemin diğer sistemin özelliklerini aldığı anlamına gelmez. Bir kuantum etkileşimi bir atom ile bir foton arasında bir korelasyon yaratabilir; ama bir atomu bir fotona ya da suyu iyileştirici bir iksire çeviremez; tıpkı iki köpek arasındaki bir etkileşimin bir Labrador retriever'ı bir Boston terrier'ye çeviremeyeceği gibi.

Kötü Sincaplardan Uzak Durun: Kuantum Fiziği Sihir Değildir

Kuantum mekaniği tuhaf ve harika bir kuramdır; bazı inanılmaz şeyleri mümkün kılmıştır. Modern teknolojinin büyük bir bölümü şu ya da bu biçimde kuantum mekaniğine dayanır; modern elektronik aygıtlar ve bilgisayar yongalarının işleyişi kuantum etkilerine dayanır; lazerler ve modern telekomünikasyonda kullanılan LED'ler, esasen kuantum aygıtlarıdır. Kuantum kuramı, geleceğin teknolojilerini besleme konusunda da inanılmaz bir potansiyele sahiptir; problemleri klasik bilgisayarlardan daha hızlı çözebilen kuantum bilgisayarlar ya da kırılamaz şifrelere başvurarak mesajları koruyan kuantum kriptografi sistemleri gibi.

Sonuçları ne kadar şaşırtıcı olursa olsun, kuantum mekaniği mucizeler için bir dayanak oluşturmaz. Tahminleri gündelik sezgilerimize aykırıdır; ama kuram sağduyuyu tam anlamıyla aşmaz. Birileri kulağa gerçek olamayacak kadar iyiymiş gibi gelen sonuçlar vaat ediyorsa muhtemelen ya kendilerine ya size yalan söylüyorlardır. Açıklamaya birkaç kuantumlu sözcük eklemek bedava enerjiyi ya da ebedi gençliği daha akla yatkın hale getirmez.

Kuantum kuramının burada bahsetmediğimiz birçok büyüleyici yönü vardır. Dünyada da keçi sakallı ya da sakalsız birçok kötü sincap vardır. Kuantum etkileriyle ilgili iddialar hakkında dikkatli düşünün ve tuhaf olsa da kuantum mekaniğinin sihir olmadığını unutmayın. Böyle yaparsanız kuantum evreninin muhteşem yönlerini keşfetme, şarlatanlardan ve çatlaklardan kaçınma konusunda hiç sıkıntı çekmezsiniz.

"Vay be ahbap, bu çok sıkıcı."

"Nedenmiş? Kuantum kuramının iyi olması için sihirli olması gerekmiyor ki."

"Hayır canım, onu demiyorum. Dolandırıcılardan bahsediyorum. Sincapların kötü olduğunu biliyordum; ama bu kadar kötü

insanlar olduğunu bilmiyordum."

"Evet, iyi bir kuramın böyle suiistimal edildiğini görmek insanı biraz üzüyor. Ama bir bakıma bir ilerleme işareti sayılabilir."

"Nereden çıkardın şimdi bunu?"

"Dönüp de 1800'lere bakarsan, insanların elektrikle ilgili aynı sihirli iddialarda bulunduğunu görebilirsin. Sırf elektrikle çalışıyorlar diye birçok akıl almaz aygıtın sihirli şeyler yaptığı ileri sürülüyordu."

"Yok ya?"

"1900'lerin ortalarında da onun yerini atom enerjisi, yani nükleer enerji aldı. İnsanlar en saçma işlerde nükleer enerji kullanıldığını iddia ediyorlardı; çok sayıda dolandırıcılık vakası da atom enerjisine dayandırılıyordu."

"Hadi ya? Ne demeye çalışıyorsun?"

"Artık insanlar bunların hiçbirine inanmıyor. Elektriğe ve nükleer enerjiye alıştık; insanlar artık onlarla ilgili saçma iddialara kulak asmıyor."

"Yani 'kuantum' da bugünün 'nükleer'i mi?"

"Büyük ölçüde. Artık eski açıklamalar işe yaramadığından dolandırıcıların bir açıklama olarak 'kuantum'a başvurması gerekiyor. Yani bir anlamda insanların 'kuantum' lafını kullanması, genel olarak kamuoyunun zaman içinde saflığını biraz yitirdiği anlamına geliyor. 'Kuantum' lafı hâlâ işe yarıyor; çünkü insanların çoğu ne anlama geldiğini bilmiyor."

"Yani daha fazla insana kuantumu öğretmen gerekiyor."

"Kesinlikle. O yüzden de bu kitabı yazdım."

"Ben de yardım ediyorum! Ben kamuya hizmet eden bir köpeğim!"

"Çok iyi bir köpeksin sen."

"Kitap bu kadar mı peki?"

"Hemen hemen. Neden?"

"Eğer bitirdiysen yürüyüşe çıkabilir miyiz?"

"Tabii."

"Kötü sincaplarla karşılaşırsak da..."

"Kötü sincaplarla karşılaşırsak onları ısırabilirsin."

"Ooo!"

Önemli Terimlerin Sözlükçesi

Belirsizlik ilkesi / Heisenberg belirsizlik ilkesi: Birbirini tamamlayan özelliklerin ölçülebilme kesinliğini sınırlayan bir dizi matematiksel ilişkiden biri. En bilinen belirsizlik ilkesi momentum ile konum arasındadır; bir tavşanın hem nerede olduğunu hem ne kadar hızlı hareket ettiğini kesin olarak bilmenin imkânsız olduğunu söyler. Konumu daha kesin olarak belirleme yönünde bir girişim momentumdaki belirsizliğin artmasına yol açar; aynı şey tersi için de geçerlidir. Enerji-zaman belirsizliği ilişkisi de önemlidir; çünkü kuantum elektrodinamiğinde sanal parçacıkların var olabileceği süreyi belirler.

Bell kuramı: John Bell'in dolanık kuantum parçacıklarının durumları arasında hiçbir yerel gizli değişken kuramının uyamayacağı biçimlerde korelasyon kurulacağını göstererek kanıtladığı matematiksel kuram.

Çoğul dünyalar yorumu: 1950'lerde Princeton'da Hugh Everett'in kuantum mekaniği için geliştirdiği felsefi çerçeve. Çoğul dünyalar yorumu, bütün olası ölçüm sonuçlarının dalga fonksiyonunun farklı dallarında alındığını söyleyerek Kopenhag yorumunun "dalga fonksiyonunun çöküşü" sorunundan kaçınır; dalga fonksiyonunun bir yerinde bütün köpekler biftek yer. Üzücüdür ki bizler dalga fonksiyonunun tek bir kolunu algılarız. Diğer kollar uyum bozulması yüzünden etkili bir biçimde birbirinden ayrılmış evrenlerdir; uyum bozulması farklı kolların birbirleri üzerinde ölçülebilir bir etkide bu-

lunmasını engeller.

Dalga fonksiyonu: Karesi, bir nesneyi izinli durumlardan birinde bulma olasılığını veren bir matematiksel fonksiyon. Kuantum mekaniğinde bütün nesneler dalga fonksiyonlarıyla betimlenir.

Dolanıklık: İki nesne arasında, bir nesnenin durumunu ölçmenin diğerinin durumunu belirleyeceği şekilde bir korelasyon kurulmasıyla oluşan "bağlantı". Aynı odada bulunan iki köpek klasik bir benzetme olabilir: Bir köpeğin uyanık olduğunu ölçerseniz hemen diğerinin de uyanık olduğunu bilirsiniz. Kuantum parçacıkları için de benzer korelasyonlar vardır; fakat kuantum parçacıklarının durumları iki parçacıktan biri ölçülene kadar belirsizdir; ölçüm yapıldığında birbirlerinden ne kadar uzak olurlarsa olsunlar her iki parçacığın da durumu anında belirlenir.

Durum/kuantum durumu: Bir nesneyi tanımlayan özellikler (konum, momentum, enerji vs.) koleksiyonu. Örneğin "oturma odasında uyumak", "mutfakta uyumak" ve "evin içinde koşmak" bir köpeğin izinli üç farklı durumudur.

Einstein, Podolsky ve Rosen (EPR) paradoksu: Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen'ın kaleme aldığı, kuantum mekaniğinin eksik olduğunu kanıtlamak için dolanık parçacıkların kullanıldığı ünlü makale. Bell kuramını sınayan deneyler bu makaledeki argümanın yanlış olduğunu kanıtlamıştır; fakat bu argüman kuantum ışınlamanın ve başka kuantum enformasyon teknolojilerinin gelişimine yol açmıştır.

Enerji: Bir nesnenin kendi hareketini ya da bir başka nesnenin hareketini değiştirme becerisinin ölçüsü. Enerjinin birçok biçimi vardır: kinetik enerji, potansiyel enerji ve kütle enerjisi gibi (Einstein'ın $E=mc^2$'si). Enerji bir biçimden diğerine çevrilebilir; ama yaratılamaz ya da ortadan kaldırılamaz.

Enerji-zaman belirsizliği: Heisenberg belirsizlik ilkesinin bir versiyonu; bir nesnenin hem enerjisini hem de enerjisinin ölçüldüğü zamanı kesin olarak bilmenin imkânsız olduğunu söyler. Bu da kuan-

tum elektrodinamiğindeki sanal parçacıkların ömrünü sınırlar.

Enerjinin korunumu: Enerjinin korunumu kanunu, enerjinin bir biçimden diğerine geçebileceğini; fakat bir sistemin toplam enerjisinin her zaman aynı kalacağını söyler. Örneğin bir köpek, bir sincabı kovalarken yediklerinde depolanmış potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirir; ama yiyeceğindeki toplam enerjiden daha fazla kinetik enerji kazanamaz.

Eşevrelilik (coherence / eşfazlılık): Dalgalar ya da dalga fonksiyonlarının bir özelliği; kabaca dalgaların sanki bir tek kaynaktan geliyormuş gibi davranması olarak tanımlanır. Eşevreli iki dalganın birbirine eklenmesi net bir girişim örüntüsü verir; uyumu bozulmuş iki dalganın eklenmesi, hızla değişerek sıvaşan ve belirsiz hale gelen bir girişim örüntüsü verir. "Uyum bozulması" süreci, daha geniş bir çevreyle rastgele ve dalgalanan etkileşimler yoluyla bir tek kaynaktan gelen iki dalga arasındaki eşevreliliği ortadan kaldırır.

Feynman diyagramı: Işıkla etkileşime giren yüklü bir parçacık için olası olaylar dizisini gösteren tablo. Her diyagram kuantum elektrodinamiğinde bir hesaplamayı temsil eder; ışıkla etkileşim içine giren parçacığın enerjisi, o parçacık için olası bütün diyagramların birbirine eklenmesiyle bulunur. Diyagramlar, hesaplamalarda kullanılan kestirme bir yol olarak bunları icat eden Richard Feynman'ın adını taşır.

Fotoelektrik etki: 1800'lerin sonlarında keşfedilmiş bir etki; bir metalin üzerine düşen ışığın elektron çıkarması. Einstein fotoelektrik etkiyi 1905'te, Planck'ın kuantum hipotezini doğrudan ışığa uygulayıp bir ışık huzmesini bir foton akışı olarak betimleyerek açıklamıştır.

Foton: Bir "ışık" parçacığı. Bir ışık parçacığı, tıpkı bir köpeğin kasesine dökülen mamalar gibi bir parçacık akışı olarak düşünülebilir. Her fotonun enerjisi, ışığın rengiyle ilişkili frenkansın Planck sabitiyle çarpılmasıyla bulunur ($E=hf$).

Girişim: İki ya da daha fazla dalganın birbirine eklenmesiyle ortaya

çıkan fenomen. Bir dalganın tepeleri diğerinin tepeleriyle örtüşüyorsa ("aynı fazdaysa") sonuç çok daha büyük bir dalgadır. Bir dalganın tepeleri diğerinin çukurlarıyla örtüşüyorsa ("zıt fazlıysa") sonuç ortada bir dalga olmamasıdır. Tek tek parçacıkların bulunduğu girişim örüntüleri kuantum davranışının en açık örnekleridir.

Görelilik: Albert Einstein'ın kütleçekimi ve ışık hızına yakın hızlarda yol alan nesnelerin davranışlarını betimlemek için geliştirdiği kuram.

Hawking ışınımı: "Sanal parçacıkların" kara deliklerin kaybolup gitmesine yol açtığı bir süreç. Bir parçacık-karşıt parçacık çifti bir kara deliğin kenarında belirdiğinde, ikisinden biri kara deliğin içine düşerken diğeri kaçabilir. Enerjiyi korumak için kara deliğin minicik bir parça kütle kaybetmesi gerekir. Her seferinde bir parçacıkla yontula yontula zamanla kara delikten geriye hiçbir şey kalmaz.

İzinli durum: Kuantum mekaniğinde bir nesnenin ölçülebileceği sınırlı sayıda durumdan biri. Örneğin dinlenen bir köpek ya yerde bulunabilir ya da kanepede; ama asla yerle kanepe arasında bir yerde bulunamaz.

Jiromanyetik oran / "g-faktörü": g sembolüyle temsil edilen, bir elektronun bir manyetik alanla nasıl etkileşim kurduğunu belirleyen rakam. En basit kuantum mekaniği kuramı, g=2 tahmininde bulunur; fakat kuantum elektrodinamiği çok küçük bir miktar daha yüksek bir değer tahmin eder. g'nin deneysel olarak ölçülmüş değeri, kuantum elektrodinamiğinin tahminiyle on dört ondalık basamağa kadar uygunluk gösterir.

Karşıt madde: Evrendeki her parçacığın onunla aynı kütleye ve tersi elektrik yüküne sahip bir karşıt madde eşdeğeri vardır. Sıradan bir madde parçacığı karşıt parçacığıyla karşılaştığında, ikisi birbirini ortadan kaldırır ve kütleleri enerjiye döner.

Kırılma: Dalgalara özgü bir davranış; dar bir açıklıktan ya da bir engelin etrafından geçen dalgalar uzağa doğru yayılır. Bir köpek bir patates cipsinin mutfak zeminine düştüğünü oturma odasından duyar; çünkü ses dalgaları mutfak kapısında ve köşelerde kırılır.

Kinetik enerji: Hareket eden nesnelerle ilişkili enerji. Gündelik nesneler için kinetik enerji, kütleyle hızın çarpımının karesinin yarısına eşittir ($1/2\ mv^2$). Bir Danua'nın kinetik enerjisi, onunla aynı hızda hareket eden bir Chihuahua'nın enerjisinden daha fazladır; hiperaktif bir Sibirya kurdunun kinetik enerjisi de onunla aynı kütleye sahip uykucu bir bloodhound'dan daha fazladır.

Klasik fizik: Yaklaşık 1900'den önce geliştirilmiş, gündelik nesnelerin davranışlarını betimleyen fizik kuralları. Kilit bileşenleri Newton'ın hareket kanunları, Maxwell'in elektrik ve manyetizma denklemleriyle, termodinamik kanunlarıdır.

Kopyalanmama kuramı: Durumunu önceden bilmeksizin bir kuantum nesnesinin mükemmel bir kopyasını çıkarmanın imkânsız olduğunu gösteren matematiksel kuram.

Kopenhag yorumu: Niels Bohr ile Danimarka'daki enstitüsündeki meslektaşlarının kuantum mekaniği için geliştirdiği felsefi çerçeve. Kopenhag yorumu kuantum mekaniğinin betimlediği mikroskobik sistemlerle klasik fiziğin betimlediği makroskobik sistemler arasında mutlak bir ayrım olduğunda ısrar eder. Mikroskobik kuantum sistemiyle makroskobik bir ölçüm aygıtı arasındaki etkileşim dalga fonksiyonunun o sistem için izinli durumlardan birine "çökmesine" yol açar.

Kuantum alan kuramı: Işık hızına yakın hızlarda hareket eden parçacıkları ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimleri kapsayabilmek için kuantum kuramını Einstein'ın görelilik kuramıyla birleştiren bir kuram. En basit kuantum alan kuramı kuantum elektrodinamiğidir.

Kuantum bilgisayarı: Klasik bir bilgisayardaki gibi sadece "0" ve "1" gibi değerlerini değil, "0" ve "1"in süperpozisyonlarını da alan "kubitler"den oluşan bilgisayar. Böyle bir bilgisayar büyük sayıların çarpanlarının alınması gibi bazı problemleri klasik bir bilgisayardan daha hızlı çözebilir. Büyük sayıların çarpanlarının alınması, modern kriptografinin temelini oluşturur; dolayısıyla bir kuantum bilgisayarı kötü bir sincabın kuş yemi alabilmek için kredi kartı işlemlerinizin

şifresini kırmasını ve banka hesabınızı boşaltmasını mümkün kılar.

Kuantum elektrodinamiği: Kısaca QED. Yüklü parçacıklar ile ışık arasındaki etkileşimi betimleyen, Richard Feynman, Julian Schwinger ve Shin-Ichiro Tomonaga'nın 1950'lerde geliştirdiği bir kuram. Feynman'ın geliştirdiği, etkileşimleri "sanal parçacıklar" arasındaki alışverişle açıklayan formülasyon bu kuramın en tanınmış versiyonudur.

Kuantum mekaniği / kuantum fiziği / kuantum kuramı: Bu kitabın konusu, kuantum mekaniği, yirminci yüzyılın ilk yarısında geliştirilmiştir; atomların, moleküllerin, atomaltı parçacıkların, ışığın davranışlarını ve bunlar arasındaki etkileşimleri betimler.

Kuantum silici: Kuantum ölçümünün bir kanıtı; bir parçacığın tam olarak ne kadar yol aldığının ölçülmesi mümkün kılınarak bir girişim örüntüsü ortadan kaldırılır, ama sonra ölçümü karıştıracak bir şeyin yapılmasıyla girişim örüntüsü geri kazanılır.

Kuantum sorgulaması: Bir nesnenin varlığını bir tek foton bile yutmasına izin vermeksizin tespit etmek için kuantum Zeno etkisini kullanan teknik. Tavşan takibine uygulanmasını her köpek biliyor olsa gerektir.

Kuantum ışınlanma: Bir kuantum parçacığının durumunu, parçacığı ölçmeden ya da hareket ettirmeden, dolanık parçacıklardan yararlanarak bir yerden diğerine tam olarak aktarma prosedürü. Maalesef köpeklerin kendilerini kolayca sincap yakalayabilecekleri yerlere ışınlamalarını mümkün kılmaz.

Kuantum Zeno etkisi: Kuantum ölçümünün bir kanıtı; bir nesnenin durumu tekrar tekrar ölçülerek durum değiştirmesi engellenir. Klasik eşdeğeri, sahibinin kestirmesini "Uyuyor musun?" sorusuyla sürekli engelleyen bir köpektir.

Modern fizik: Yaklaşık 1900'den sonra geliştirilmiş, başta görelilik ve kuantum mekaniğinden oluşan fizik kuramları.

Momentum: Bir çarpışma sırasında neler olacağını belirleyen, hare-

kütle ilişkili bir nicelik. Klasik fizikte momentum kütle ile yönlü hızın çarpımına eşittir (*p=mv*); momentumlarının aynı olabilmesi için küçük bir Chihuahua'nın bir Danua'dan çok çok hızlı hareket ediyor olması gerekir. Kuantum mekaniğinde bir parçacığın momentumu, de Broglie ilişkisi ($\lambda = h/p$) yoluyla parçacığın dalga boyunu belirler.

Olasılık: Bir kuantum nesnesinin dalga boyu, bir ölçüm yapıldığında o nesneyi izinli durumlardan birinde bulma olasılığını betimler.

Ölçüm: Kuantum mekaniğinde ölçülen sistemin halini değiştiren etkin bir süreç. Bir ölçüm yapılmadan önce, bir kuantum nesnesi izinli durumların bir süperpozisyonunda olacaktır; ölçümden sonra nesne sadece ve sadece bir halde olur. Kopenhag yorumu ve çoğul dünyalar yorumu bir ölçüm sırasında neler olduğunu betimlemenin iki farklı yolunu sunar.

Parçacık-dalga ikilemi: Kuantum mekaniğinde nesnelerin hem parçacık hem dalga özellikleri göstermesi. Klasik fizik ışığın bir dalga olduğunu söyler; ama kuantum fiziği bir ışık huzmesinin aynı zamanda bir foton akışı olduğunu söyler. Klasik fizik elektronun bir parçacık olduğunu söyler; ama kuantum fiziği elektronun momentumuna dayalı bir dalga boyunun da olduğunu söyler. Elektronlar da fotonlar da "kuantum parçacıkları"dır; ne parçacık ne dalga olan, ama ikisinin de özelliklerini gösteren üçüncü bir grup nesnelerdir.

Planck sabiti (h): Kuantum fiziğinde enerjiyi frekansla, yani dalga boyunun momentumuyla ilişkilendiren sabit. Ölçülen değer h=6, 6261 x 10^{-34} J-s'dir; yani 0, 000000000000000000000000000000000066261 J-s'dir, bu oldukça küçük bir rakamdır.

Polarizasyon: Işığın, klasik fizikte ışık dalgasının salınım yönüne denk gelen bir özelliği. Polarizasyon dikey ve yatay polarizasyonların bir bileşkesi olarak betimlenebilir ve ışığın dikey ya da yatay bir polarize ediciden geçme olasılığını belirler.

Polarize edici/polarize edici filtre: Bir açıda polarize olmuş ışığın geçmesini mümkün kılıp o açıya 90 derece uzak bir açıyla polarize edilmiş ışığı engelleyen bir malzeme. Ara bir açıda polarize olmuş ışı-

ğın geçme olasılığı açıya bağlıdır.

Potansiyel enerji: Hareket etmeyen, ama hareket etmeye başlama potansiyeline sahip bir nesneyle ilişkili enerji. Bir köpeğin uyurken bile potansiyel enerjisi vardır; en ufak bir seste bile sıçrayıp ortada bir şey yokken havlamaya başlayabilir.

Sanal parçacık: Feynman diyagramında, doğrudan ölçülemeyecek kadar hızlı belirip kaybolan bir parçacık. Bu parçacıklar genellikle bir normal parçacık ve bir karşıt madde parçacık olarak belirir; çoğunlukla da bir elektron ve bir pozitron olarak. Prensipte, her şey, peynirden yapılmış bir tavşancık bile bir sanal parçacık olarak ortaya çıkabilir.

Schrödinger denklemi: Fizikçilerin bir kuantum sisteminin dalga fonksiyonunu bulmak ve zaman içinde sistemin nasıl değiştiğini tahmin etmek için kullandığı matematiksel formül.

Schrödinger'in kedisi: Erwin Schrödinger'in ileri sürdüğü, kuantum süperpozisyonlarının saçmalığını göstermeyi amaçlayan bir düşünce deneyi. Schrödinger bir kedinin bir saat içinde onu öldürme olasılığı yüzde 50 olan bir aygıtla birlikte bir kutuya kapatıldığını düşünmüştü; kuantum fiziği bu bir saatin sonunda hali ölçülünceye kadar kedinin hem ölü hem diri olduğunu söyler. Bu deney Schrödinger'i köpek fizikçilerin kahramanı yapmıştır.

Sıfır noktası enerjisi: Maddenin dalga niteliği sayesinde, bir kuantum nesnesinde her zaman var olan çok çok az miktarda enerji. Sınırlanan kuantum nesneleri hiçbir zaman tam anlamıyla hareketsiz olmaz; tıpkı bir sepetin içindeki köpek yavruları gibi uyuyorken bile sürekli kıpır kıpır dolanıp yer değiştirirler.

Süperpozisyon hali: Kuantum mekaniğinde bir ölçüm yapılana kadar bir nesne iki ya da daha fazla izinli durumun süperpozisyonunda bulunabilir. Bu süperpozisyon durumları, sistem bir tek izinli durumda ölçülebilse bile, deneysel olarak tespit edilebilecek girişim örüntülerine yol açar.

Termal radyasyon: "Kara cisim radyasyonu" da denir; sıcak bir nesnenin saldığı ışık; bir ocağın üstündeki kızgın tavanın kızıl ışığı gibi. Bu ışığın tayfı, sadece nesnenin ısısına dayanır. Bu tayfı açıklaması, Max Planck'ın kuantum mekaniğinin açılışını yapmasını beraberinde getirmiştir.

Tünelleme: Bir engeli aşacak kadar enerjisi olmayan bir kuantum parçacığının, yine de engeli aşıp tıpkı bir çitin altına çukur kazan kötü bir köpek gibi öbür tarafta belirivermesi.

Uyum bozulması (decoherence): Çevreyle rastgele, dalgalanan etkileşimlerin bir kuantum parçacığı için bir girişim örüntüsü görme becerimizi ortadan kaldırdığı süreç. Uyum bozulması özellikle çoğul dünyalar yorumu açısından önemlidir; evrenin dalga fonksiyonunun farklı dallarının birbirlerini etkilememesini sağlar. [ç.n.: Bu terim için tam bir Türkçe karşılık bulunmuyor. Bilim veTeknik dergisinin *Yeni Yüzyıl Yeni Fizik* başlıklı sayısında (Nisan 1999) Prof. Dr. Tekin Dereli ve Raşit Gürdilek'in aynı adlı makalelerinin "Kuantumda Gerçek Çok" bölümünden yararlanarak "uyum bozulması" terimini benimsedim.]

Yarı klasik argüman: Fiziksel bir sistemin, büyük ölçüde klasik fiziğe dayanan, tek tek vakalarla ilgili olarak birkaç modern fikri bir araya getiren betimlemesi. Yarı klasik model örnekleri arasında "Heisenberg mikroskobu" ile Bohr'un hidrojen modeli yer alır.

Yerel gizli değişken kuramı: Einstein, Podolsky ve Rosen'ın tercih ettiği türden bir kuram. Bir yerel gizli değişken kuramında bir konumda yapılan ölçümler başka konumlarda ("yerel") yapılan ölçümlerden bağımsızdır ve parçacıklar kesin değerleri bilinmese ("gizli değişkenler") de her zaman kesin durumlardadır. Yerel gizli değişken kuramları kuantum mekaniğinin bütün tahminleriyle aynı sonuçları vermez (Bell kuramına göre); başka deneylerin yanı sıra Alain Aspect'nin yaptığı deneylerle yanlış oldukları kanıtlanmıştır.

Teşekkürler

Bu kitapta betimlenen fiziği yaklaşık yirmi yıllık bir süre zarfında çok sayıda öğretmenimden ve meslektaşımdan öğrendim. Bill Phillips, Steve Rolston, Paul Lett, Kris Helmerson, Ivan Deutsch, Aephraim Steinberg, Luis Orozco, Paul Kwiat, Mark Kasevich, Dave DeMille, Seyfie Maleki, Kevin Jones, Jeff Strait, Stuart Crampton ve Bill Wootters'a çok teşekkür ederim. Açıklamalardaki bütün iyi kısımların ardında onlar vardır; hatalarsa bana aittir.

Kitabın ilk taslaklarından birini okuyan yılmaz okurlarım Jane Acheson, Lisa Bao, Aaron Bergman, Sean Carroll, Yoon Ha Lee, Matt McIrvin ve Frances Moffet'ten çok yararlı yorumlar aldım. Michael Nielsen ve David Kaiser de taslaklar üzerine yararlı yorumlarda bulundular. Hepsi de bu kitabın, daha iyi bir kitap haline gelmesine katkıda bulundu.

Bu kitap "Uncertain Principles" (Belirsiz İlkeler) başlıklı weblog'umdaki (http: //scienceblogs.com/principles) birkaç yorumla başladı; o yorumlar nihayetinde dördüncü ve dokuzuncu bölümün başlarındaki diyaloglara dönüştü. ScienceBlogs'daki ahbaplarım Christopher Mims, Katherine Sharpe, Erin Johnson ve Arikia Millikan'a bana bir platform sundukları; Boing Boing'deki Cory Doctorow'a ve Digg'deki insanlara blogumdaki yorumları yaygınlaştırdıkları için teşekkür ederim. Barrett Garese, Erin Ho-

sier ve Patrick Nielsen Hayden köpeğimle birlikte bir fizik kitabı yazmanın iyi bir fikir olduğuna beni ikna ettiklerinden teşekkürü hak ediyorlar. Kitaba şekil verilmesine ve benim fizikteki hiçbir şeye benzemeyen yayın sürecinde yolu bulmama yardımlarından dolayı editörüm Beth Wareham ve ajansım Erin Hosier'ye çok teşekkür ederim.

Emmy, New York'ta Menands'taki Mohawk & Hudson River Humane Society barınağından alındı. (http://www.mohawkhumanesociety.org) Çoğu hayvan barınağı gibi orası da harika köpeklerin (ve başka hayvanların) bulunduğu mükemmel bir kaynak; köpek almayı düşünenler varsa civarlarındaki hayvan barınaklarına bir uğramalarını tavsiye ederim.

Yıllar içinde birçok köpekle tanışma şansını yakaladım: Patches, Rory, Truman, merhum muhteşem RD, Bodie, Tinker. Bu kitapta hepsinden bir parça var. Fakat takdirin çoğu hiç tartışmasız gelmiş geçmiş en iyi Emmy olan Niskayuna Kraliçesi Emmy'ye.

Bu işi biraz tuhaf bulmakla birlikte bana muazzam bir destek veren dostlarıma ve aileme çok teşekkür ederim. Son olarak eşim Kate Nepveu'ya sayılamayacak kadar çok taslağı okuyup nazikçe gramerimi düzelttiği, ortalığa saçtığım fikirleri sabırla dinlediği; Claire bebeğe de işleri olabilecek en güzel biçimde karıştırdığı, her şeyden de önce köpekle aptalca sohbetlere giriştiğimde attığı kahkahalarla ilham verdiği için teşekkür ederim. O olmasaydı kelimenin tam anlamıyla bunların hiçbiri olmazdı.

KÖPEĞİNİZE KUANTUM FİZİĞİNİ NASIL ÖĞRETİRSİNİZ?

CHAD ORZEL

Kuantum fiziği herhalde en ilginç, en gizemli bilimsel konudur; sevimli bir köpekle yapılan Sokratik bir tartışmanın onun örtüsünü kaldıracağını kim bilebilirdi?
Cory Doctorow

Orzel'in kuantum fiziğine mizah dolu yaklaşımı nefis; Emmy de bu son derece gizemli mevzunun incelikleri hakkında hepimizin sormak istediklerini soran mükemmel bir köpek.
Jennifer Oullette

Bu küçük çekici kitap modern bilimin en tuhaf ve en önemli konularından birini öğrenmenin en eğlenceli yolu.
William D. Phillips, 1997 Fizik Nobel Ödülü sahibi

Chad Orzel ve sevgili köpeği Emmy sayesinde nihayet Heisenberg kesinsizlik ilkesini anladım! Emmy'nin herhalde benden daha çabuk kavradığı kritik önemdeki diğer fikirlerin lafını bile etmiyorum. Köpeğinize Kuantum Fiziğini Nasıl Öğretirsiniz, modern fizik hakkında en ufak bir fikri olmayan insanlar için bile bir lütuf.
Spencer Quinn

